

SÉRGIO MICHELOTTO BRAGA

**UMA NOVA ABORGAGEM PARA INTEGRAÇÃO ENTRE
QUANTIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA PARA A AVALIAÇÃO DA
POLUIÇÃO DIFUSA**

**CURITIBA
2013**

SÉRGIO MICHELOTTO BRAGA

**UMA NOVA ABORGAGEM PARA INTEGRAÇÃO ENTRE
QUANTIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA PARA A AVALIAÇÃO DA
POLUIÇÃO DIFUSA**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor.

Área de Concentração: Eng. de Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Cristovão Vicente
Scapulatempo Fernandes, Ph.D

Coorientador: Prof. Eduardo Parente Ribeiro, Dr.

**CURITIBA
2013**

TERMO DE APROVAÇÃO
SÉRGIO MICHELOTTO BRAGA

**“UMA NOVA ABORGAGEM PARA INTEGRAÇÃO ENTRE QUANTIDADE E QUALIDADE DA
ÁGUA PARA A AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO DIFUSA”**

Tese aprovada como requisito para obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:

Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes
Universidade Federal do Paraná
Orientador

MEMBROS:

Eduardo Parente Ribeiro
Universidade Federal do Paraná
Coorientador

Sérgio Koide
Universidade de Brasília

Miriam Rita Moro Mine
Universidade Federal do Paraná

Irani dos Santos
Universidade Federal do Paraná

Gideon Villar Leandro
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 2 de setembro de 2013

DEDICATÓRIA

Esta tese é dedicada a minha mulher, Cristina, que suportou bravamente todas as provas que resultaram neste trabalho, oferecendo apoio, incentivo e carinho por toda a caminhada. Sua luz e sua persistência me guiam sempre, moça.

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

À Márcia Cristina Lopes Quintas, *in memorian*, que se preocupou comigo no momento mais difícil de sua vida. Tenho certeza que ela continua a nos proteger em nossa caminhada;

À família Fernandes, que me acolheu como membro honorário, compartilhando alegrias e oferecendo carinho e apoio nas horas difíceis;

À Victória Quintas Fernandes, que me chama de padrinho, e que muito me honra pela sua confiança e carinho. Que sua luz seja retribuída com muita felicidade, moça.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Cristóvão, irmão e companheiro de caminhada. Em seu coração de ouro há sempre um lugar no qual podemos nos abrigar nos momentos difíceis. Cris, meu agradecimento mais profundo.

A Artur Sass Braga, meu amigo, sobrinho e afilhado. Palavras são poucas para expressar minha gratidão, Bacalhau. Este trabalho não teria sido realizado sem o seu suporte e apoio. Torço para que você receba em dobro toda a bondade que transmite a todos que o cercam.

Ao meu coorientador, Eduardo, pela contribuição indispensável à realização deste trabalho. Espero poder retribuir, ao menos em parte, toda a amizade e o suporte que você me ofereceu.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – PPGERHA pela confiança depositada e pela estrutura oferecida para a realização deste trabalho.

À Mônica Ferreira do Amaral Porto, por ter levantado o problema em cuja solução os esforços desta tese foram empregados, meu agradecimento. Espero poder enviar um amostrador.

Aos colegas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná, que me ofereceram grande suporte e permitiram meu afastamento das funções didáticas para poder me dedicar integralmente aos estudos.

À Patrícia Dall’Agnol, exemplo de esforço, determinação e superação, pela dedicação e pelo carinho dedicado à realização de grande parte das análises constantes neste trabalho.

A Mauricius Marques dos Santos, que de maneira competente processou em nossas amostras todas as análises de metais, um grande e agradecido abraço.

Ao Professor Júlio Cesar de Azevedo, pelo suporte oferecido na realização das análises de metais, as quais foram realizadas em seu laboratório na Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Aos meus colegas do PPGERHA, com quem tive o privilégio de poder conviver ao longo dos anos e que compartilharam comigo as dificuldades e alegrias dessa minha caminhada, meu agradecimento. Que nos fique para sempre a lembrança do tempo em que caminhamos juntos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. JUSTIFICATIVA.....	3
1.2. HIPÓTESE.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.4. ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	4
1.5. CONTRIBUIÇÃO DA TESE.....	8
1.6. ESTRUTURA DA TESE.....	8
 2. POLUIÇÃO DIFUSA EM RIOS URBANOS E AS DIFICULDADES DE MONITORAMENTO	 10
2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
2.1.1. Poluição difusa.....	10
2.1.2. Eventos.....	11
2.1.3. Concentração média do evento (EMC).....	12
2.1.4. Separação do escoamento superficial.....	13
2.2. MEDIÇÃO E MONITORAMENTO EM POLUIÇÃO DIFUSA.....	14
2.3. ESTIMATIVA DE CARGA EM TRECHOS DE RIOS URBANIZADOS.....	19
2.4. AMOSTRADORES AUTOMÁTICOS.....	21
2.5. ESTRATÉGIAS DE AMOSTRAGEM.....	29
2.6. ANÁLISE CRÍTICA.....	32
 3. A VARIÁVEL HIDROLÓGICA DINÂMICA.....	 34
3.1. CONCEITO.....	34
3.2. DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA UMA ESTAÇÃO REAL – A BACIA DO RIO BARIGUÍ.....	37
3.2.1. A definição do ponto de monitoramento.....	38
3.2.2. O programa para testar os parâmetros de variação.....	39
3.2.3. Resultados teóricos sobre a série de dados da estação Tamandaré.....	40
3.3. ANÁLISE CRÍTICA.....	48
 4. AMOSTRAGEM AUTOMÁTICA COM O USO DO NÍVEL COMO VARIÁVEL HIDROLÓGICA DINÂMICA – A AMOSTRAGEM INTELIGENTE.....	 49
4.1. UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS CONVENCIONAIS.....	49
4.1.1. Programando um logger para comandar a coleta de amostras.....	50
4.1.2. A interface de comunicação.....	52

4.1.3. Programando um ISCO para receber sinais de um datalogger.....	53
4.1.4. Instalando na estação Tamandaré.....	55
4.2. RESULTADOS DA AMOSTRAGEM INTELIGENTE – O CONJUNTO	
ISCO-LOGGER OPERANDO NA ESTAÇÃO TAMANDARÉ.....	56
4.2.1. Os primeiros hidrogramas – Resultados iniciais da amostragem inteligente.....	56
4.2.2. Amostragem Inteligente em um evento típico – detalhes de um processo de amostragem.....	58
4.2.2.1. Resultados das análises.....	61
4.2.2.2. A lavagem inicial.....	63
4.2.2.3. A concentração média do evento (EMC).....	69
4.3. AS VANTAGENS DA AMOSTRAGEM INTELIGENTE.....	70
4.3.1. Comparação entre amostragens inteligente e temporizada.....	70
4.4. ANÁLISE CRÍTICA.....	75
5. O AMOSTRADOR AUTOMÁTICO MICROPROCESSADO SBN.....	78
5.1. CONCEPÇÃO E CAPACIDADES.....	79
5.2. O AMOSTRADOR SBN – PRIMEIRA VERSÃO OPERACIONAL.....	83
5.3. INSTALANDO O SBN NA ESTAÇÃO TAMANDARÉ.....	86
5.4. EXEMPLO DE RESULTADO DA AMOSTRAGEM COM O SBN.....	90
5.5. ANÁLISE CRÍTICA.....	95
6. VALIDAÇÃO DA AMOSTRAGEM INTELIGENTE PELA COMPARAÇÃO COM MEDIDAS DE TURBIDEZ.....	96
6.1. O MÉTODO DE COMPARAÇÃO – EXEMPLO PARA UM EVENTO.....	98
6.2. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE COMPARAÇÃO EM OUTROS EVENTOS.....	101
6.3. A VALIDAÇÃO PELA AMOSTRAGEM PARALELA.....	106
6.4. ANÁLISE CRÍTICA	111
7. RESULTADOS.....	114
7.1. ROTEIRO DA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	115
7.2. RESULTADOS DA 1ª FASE DO ESTUDO – A AMOSTRAGEM INTELIGENTE VIA ISCO-LOGGER.....	116
7.3. RESULTADOS DA 2ª FASE DO ESTUDO – A AMOSTRAGEM INTELIGENTE REALIZADA TANTO PELO ISCO-LOGGER QUANTO PELO SBN.....	127

7.4. RESULTADOS DA 3ª FASE DO ESTUDO – A AMOSTRAGEM INTELIGENTE REALIZADA PELO SBN, AMOSTRAGEM TEMPORIZADA REALIZADA PELO ISCO.....	139
7.5. ANÁLISE CRÍTICA.....	145
8. CONCLUSÃO.....	146
REFERÊNCIAS.....	149
APÊNDICE 1 – HISTÓRICO.....	155
APÊNDICE 2 – PROGRAMA ISCO-LOGGER.....	169

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – ESQUEMA DO DESENVOLVIMENTO DA TESE.....	7
FIGURA 2.1 – ASPECTOS CONCEITUAIS DA LAVAGEM INICIAL (CBFF).....	18
FIGURA 2.2 – LAVAGEM INICIAL PROEMINENTE (MBFF).....	18
FIGURA 2.3 – AMOSTRADOR AUTOMÁTICO ISCO®.....	22
FIGURA 2.4 – ERRO DE ESTIMATIVA DE CARGA CAUSADO PELA ADOÇÃO DE UM ELEVADO PATAMA DE INÍCIO DE COLETA.....	24
FIGURA 2.5 – CARGA REGISTRADA COM AMOSTRAGEM CORRETA.....	24
FIGURA 2.6 – SUBAMOSTRAGEM CAUSADA PELA ESCOLHA DE UM INTERVALO DE TEMPO INADEQUADO AO EVENTO.....	26
FIGURA 2.7 – ESQUEMA DO AMOSTRADOR DE NÍVEL ASCENDENTE.(ANA)	27
FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DA BACI DO RIO BARIGUI.....	37
FIGURA 3.2 – VISTA GERAL DA ESTAÇÃO TAMANDARÉ.....	38
FIGURA 3.3 – VISTA DA ESTAÇÃO TAMANDARÉ.....	39
FIGURA 3.4 – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA.....	40
FIGURA 3.5 – LINIGRAMA DA ESTAÇÃO TAMANDARÉ (JANEIRO A JULHO DE 2008).....	42
FIGURA 3.6 – DESPERDÍCIO DE AMOSTRAGEM.....	43
FIGURA 3.7 – PROBLEMAS NA AMOSTRAGEM CAUSADOS PELA BAIXA RESOLUÇÃO TEMPORAL	44
FIGURA 3.8 – AMOSTRAGEM COM MELHOR RESOLUÇÃO.....	46

FIGURA 4.1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA IMPLEMENTADO NO DATALOGGER H500-XL.....	51
FIGURA 4.2 – INTERFACE DE DESACOPLAMENTO LOGGER – AMOSTRADOR.....	52
FIGURA 4.3 – CONFIGURAÇÃO DA PORTA DE COMUNICAÇÃO DO ISCO	53
FIGURA 4.4 – TREM DE 3 PULSOS PRODUZIDOS PELO DATALOGGER.....	54
FIGURA 4.5 – ESQUEMA DE MONTAGEM DA ESTAÇÃO TAMANDARÉ.....	55
FIGURA 4.6 – LINIGRAMA E AMOSTRAGENS PARA JANEIRO E FEVEREIRO DE 2012.....	57
FIGURA 4.7 – EVENTO REGISTRADO E COLETADO PELO ISCO-LOGGER.....	59
FIGURA 4.8 – AMOSTRAS COLETADAS ENTRE 10 E 12/02/2012.....	60
FIGURA 4.9 – VARIAÇÃO TEMPORAL DOS SÓLIDOS TOTAIS.....	63
FIGURA 4.10 – VARIAÇÃO TEMPORAL DE COD.....	64
FIGURA 4.11 – DESCARGA INSTANTÂNEA PARA O EVENTO.....	65
FIGURA 4.12 – DESCARGA ACUMULADA PARA O EVENTO.....	65
FIGURA 4.13 – TRANSPORTE UNITÁRIO PARA SÓLIDOS TOTAIS.....	66
FIGURA 4.14 – TRANSPORTE UNITÁRIO PARA O CARBONO TOTAL	67
FIGURA 4.15 – TRANSPORTE UNITÁRIO PARA DQO.....	68
FIGURA 4.16 – COMPARATIVO ENTRE DQO, CARBONO TOTAL E SÓLIDOS TOTAIS.....	69
FIGURA 4.17 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE VERSUS AMOSTRAGEM TEMPORIZADA - EVENTO DE 02/2012	71
FIGURA 5.1 – CONCEPÇÃO DO SBN.....	80
FIGURA 5.2 – SEQUÊNCIA DE COLETA DE AMOSTRAS.....	81
FIGURA 5.3 – SEQUÊNCIA DE DESCARTE DE AMOSTRAS.....	82

FIGURA 5.4 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SBN.....	84
FIGURA 5.5 – MÓDULO DE COMANDO DO SBN.....	86
FIGURA 5.6 – CONJUNTO DE COLETA DO AMOSTRADOR SBN.....	87
FIGURA 5.7 – INSTALANDO NA ESTAÇÃO TAMANDARÉ.....	87
FIGURA 5.8 – MONTAGEM DA UNIDADE DE BOMBEAMENTO DO SBN	88
FIGURA 5.9 – DETALHE DA MONTAGEM DA UNIDADE DE BOMBEAMENTO DO SBN.....	89
FIGURA 5.10 – COLETAS COMANDADAS PELO AMOSTRADOR SBN	91
FIGURA 5.11 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE COM O ISCO-LOGGER	92
FIGURA 5.12 – SBN VERSUS ISCO-LOGGER.....	93
FIGURA 6.1 – SENSOR DE TURBIDEZ MODELO DTS-12	97
FIGURA 6.2 – EVENTO REGISTRADO EM DEZEMBRO/2012.....	99
FIGURA 6.3 – COMPARAÇÃO ENTRE EVENTOS.....	104
FIGURA 6.4 – HIDROGRAMA DO EVENTO 22.....	105
FIGURA 6.5 – DETALHE DA ENTRADA DO AMOSTRADOR ISCO®	107
FIGURA 6.6 – COLETAS REALIZADAS PELO SBN – A AMOSTRAGEM INTELIGENTE.....	108
FIGURA 6.7 – COLETAS REALIZADAS PELO ISCO - AMOSTRAGEM TEMPORIZADA.....	108
FIGURA 6.8 – DETALHE DAS AMOSTRAS COLEADAS PELO AMOSTRADOR SBN.....	109
FIGURA 7.1 – EVENTO 1.....	119
FIGURA 7.2 – EVENTO 8.....	119
FIGURA 7.3 – EVENTO 10.....	120

FIGURA 7.4 – EVENTO 11.....	120
FIGURA 7.5 – EVENTO 12.....	120
FIGURA 7.6 – EVENTO 13.....	121
FIGURA 7.7 – EVENTO 14.....	121
FIGURA 7.8 – EVENTO 15.....	121
FIGURA 7.9 – EVENTO 16.....	122
FIGURA 7.10 – EVENTO 2.....	122
FIGURA 7.11 – EVENTO 3.....	123
FIGURA 7.12 – EVENTO 3a.....	123
FIGURA 7.13 – EVENTO 3b.....	123
FIGURA 7.14 – EVENTO 4.....	124
FIGURA 7.15 – EVENTO 5.....	124
FIGURA 7.16 – EVENTO 6.....	124
FIGURA 7.17 – EVENTO 7.....	125
FIGURA 7.18 – EVENTO 9.....	125
FIGURA 7.19 – VARIABILIDADE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA vs DURAÇÃO DO EVENTO PLUVIAL.....	126
FIGURA 7.20 – EVENTO 17 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE ISCO LOGGER.....	130
FIGURA 7.21 – EVENTO 17 – AMOSTRAGEM TEMPORIZADA SIMULADA.....	130
FIGURA 7.22 – EVENTO 18 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE ISCO LOGGER.....	131
FIGURA 7.23 – EVENTO 18 – AMOSTRAGEM TEMPORIZADA SIMULADA.....	131
FIGURA 7.24 – EVENTO 19 – EVENTO SEM SEQUÊNCIA.....	131
FIGURA 7.25 – EVENTO 20 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE ISCO-LOGGER	132
FIGURA 7.26 – EVENTO 20 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE SBN.....	132

FIGURA 7.27 – EVENTO 20 – AMOSTRAGEM TEMPORIZADA SIMULADA.....	132
FIGURA 7.28 – EVENTO 21 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE ISCO LOGGER.....	133
FIGURA 7.29 – EVENTO 21 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE SBN.....	133
FIGURA 7.30 – EVENTO 21 – AMOSTRAGEM TEMPORIZADA SIMULADA.....	133
FIGURA 7.31 – EVENTO 22 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE ISCO LOGGER.....	134
FIGURA 7.32 – EVENTO 23 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE ISCO LOGGER.....	134
FIGURA 7.33 – EVENTO 23 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE SBN	134
FIGURA 7.34 – EVENTO 23 – AMOSTRAGEM TEMPORIZADA SIMULADA.....	135
FIGURA 7.35 – EVENTO 24 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE ISCO LOGGER.....	135
FIGURA 7.36 – EVENTO 24 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE SBN.....	135
FIGURA 7.37 – EVENTO 24 – AMOSTRAGEM TEMPORIZADA SIMULADA.....	136
FIGURA 7.38 – EVENTO 24 – EVOLUÇÃO DA TURBIDEZ.....	136
FIGURA 7.39 – EVENTO 25 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE SBN.....	141
FIGURA 7.40 – EVENTO 25 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE COMPLETA.....	141
FIGURA 7.41 – EVENTO 25 – AMOSTRAGEM TEMPORIZADA SIMULADA.....	141
FIGURA 7.42 – EVENTO 26 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE SBN.....	142
FIGURA 7.43 – EVENTO 26 – AMOSTRAGEM TEMPORIZADA SIMULADA.....	142
FIGURA 7.44 – EVENTO 27 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE SBN.....	142
FIGURA 7.45 – EVENTO 27 – AMOSTRAGEM TEMPORIZADA ISCO.....	143

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – CARACTERÍSTICAS E LIMITAÇÕES DOS AMOSTRADORES AUTOMÁTICOS.....	29
QUADRO 3.1 – SITUAÇÕES CRÍTICAS A SEREM EVITADAS.....	35
QUADRO 3.2 – APLICAÇÃO DO NÍVEL COMO VARIÁVEL HIDROLÓGICA DINÂMICA.....	36
QUADRO 3.3 – RESUMO DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM.....	46
QUADRO 3.4 – AMOSTRAGEM COM A INCORPORAÇÃO DE EXCESSOS AOS PATAMARES DE COLETA.....	47
QUADRO 4.1 – RESULTADOS PARA CTD, COD, CID E DQO.....	61
QUADRO 4.2 – RESULTADOS PARA A SÉRIE DE SÓLIDOS.....	62
QUADRO 4.3 – RESULTADOS DE CÁLCULO DO EMC PARA A SÉRIE DE SÓLIDOS.....	69
QUADRO 4.4 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE VERSUS AMOSTRAGEM TEMPORIZADA.....	72
QUADRO 4.5 – RESULTADOS DA AMOSTRAGEM INTELIGENTE.....	73
QUADRO 4.6 – RESULTADOS DA AMOSTRAGEM TEMPORIZADA (INTERPOLADOS).....	74
QUADRO 4.7 – DIFERENÇA NOS VALORES DE EMC.....	75
QUADRO 6.1 – RESULTADOS PARA TURBIDEZ	101
QUADRO 6.2 – AMOSTRAGEM INTELIGENTE VERSUS AMOSTRAGEM TEMPORIZADA.....	103
QUADRO 6.3 – COMPARAÇÃO DAS MEDIDAS DE TURBIDEZ.....	111
QUADRO 7.1 – RESUMO DAS CONFIGURAÇÕES DOS AMOSTRADORES.....	115

QUADRO 7.2 – EVENTOS COLETADOS EXCLUSIVAMENTE PELO ESQUEMA	
ISCO-LOGGER PARA AMOSTRAGEM INTELIGENTE.....	117
QUADRO 7.3 – EVENTOS COLETADOS EXCLUSIVAMENTE PELO ESQUEMA	
ISCO-LOGGER PARA AMOSTRAGEM INTELIGENTE	
(COMPLEMENTO).....	118
QUADRO 7.4 – RESULTADOS DE EMC PARA OS EVENTOS ANALISADOS.....	126
QUADRO 7.5 – AMOSTRAGEM COM ISCO E SBN OPERANDO EM PARALELO.....	129
QUADRO 7.6 – VALORES DE EMC NA 2ª FASE DOS EXPERIMENTOS.....	138
QUADRO 7.7 – SBN EM PARALELO COM O ISCO TEMPORIZADO.....	140
QUADRO 7.8 – VALORES DE EMC NA 3ª FASE DOS EXPERIMENTOS.....	144

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANA	Amostrador de Nível Ascendente
AND	Amostrador de Nível Descendente
BRB	Bacia do Rio Barigui
C	Concentração de um determinado poluente, expressa em mg/L
CBFF	<i>Concentration Based First Flush</i> – modo de análise do fenômeno da lavagem inicial baseado na evolução da concentração
CID	Carbono Inorgânico Dissolvido
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
COT	Carbono Orgânico Total
CDT	Carbono Dissolvido Total
DC	<i>Direct Current</i> – Corrente Contínua
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMC	Concentração Média do Evento (mais utilizada na forma inglesa <i>event mean concentration</i>), expressa em mg/L
EMC _m	Média das Concentrações Médias do Eventos, expressa em mg/L
I/O	<i>Input/Output</i> Porta de comunicação do processador com capacidade para enviar ou receber sinais
ISCO	Denominação mais utilizada para amostradores automáticos produzidos pela Teledyne Isco Corporation.
MBFF	<i>Mass Based First Flush</i> – modo de análise do fenômeno da lavagem inicial baseado na evolução do transporte acumulado de massa
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i> Unidade Nefelométrica de Turbidez

Q	Vazão, expressa em m³/s
RTC	<i>Real Time Clock</i> (relógio interno do microprocessador)
SB	Denominação utilizada nesta tese para a série de amostradores automáticos nela desenvolvidos
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSF	Sólidos Suspensos Fixos
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SDF	Sólidos Dissolvidos Fixos
SDV	Sólidos Dissolvidos Voláteis
SBN	Amostrador Automático com capacidade para efetuar a Amostragem Inteligente
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

RESUMO

A quantificação do aporte de poluentes que chegam aos rios por mecanismos difusos depende de mensuração adequada das suas concentrações nos momentos em que a vazão é aumentada pelo escoamento superficial – provocado por chuvas de maior intensidade. A arte da coleta automática de amostras se impõe para que seja possível acompanhar o desenrolar de eventos de chuva, exigindo parcimônia na escolha e na regulação de amostradores automáticos. A variabilidade dos eventos, entretanto, impõe limites aos pesquisadores, que precisam ajustar equipamentos a eventos vindouros, sabendo que um inadequado ajuste da amostragem aos hidrogramas pode conduzir a estimativas erradas para as concentrações médias dos eventos. A definição prévia de parâmetros como o patamar de nível ou vazão a partir do qual a amostragem será iniciada, ou como os intervalos de tempo, nível, vazão ou volume transportado que determinarão a coleta de novas amostras é fonte de dúvidas e incertezas. Nesta pesquisa apresenta-se o conceito “Variável Hidrológica Dinâmica”, como sendo um parâmetro qualquer cuja variação possa ser utilizada para determinar mais adequadamente os melhores momentos para a realização de coletas automáticas de amostras. O conceito foi testado utilizando informações do nível da seção em estudo, localizada no rio Barigui, na região metropolitana de Curitiba, e verificado por meio de um esquema de amostragem controlado pelo Datalogger da estação hidrométrica automática nela instalada, o qual foi programado para efetuar cálculos comparativos entre leituras diferentes e disparar o processo da coleta de amostras de um amostrador automático convencional de acordo com a evolução dos eventos, ajustando-o automaticamente, em tempo real, ao hidrograma do evento. Resultados demonstraram que o método produz coleções de amostras mais representativas para a turbidez média do evento – parâmetro de comparação escolhido em função da confiabilidade da leitura do sensor automático utilizado na estação. Para ampliar a possibilidade de utilização desta técnica de amostragem, um amostrador microprocessado foi projetado e construído. O aparelho demonstrou, em testes operacionais de mais de 180 dias, ser capaz de realizar a amostragem comandada pela Variável Hidrológica Dinâmica e espelhar as coletas realizadas pelo esquema implementado no datalogger da estação hidrológica automática. Uma vez comprovada a capacidade do equipamento, denominado SBN, foi realizado um teste comparativo entre a amostragem do aparelho e a amostragem automática convencional mais comumente utilizada – operada por temporização – ficando demonstrada a superioridade da amostragem do SBN para os mesmos eventos.

ABSTRACT

The quantification of diffuse pollutions process affecting water bodies is dependent of pollutant concentration measurements taken from water samples collected during runoff events. A good match between the samples collection to the shape of the hydrograms is desired for the better estimation of the loads. Sampling is usually done by automatic equipment, which has to be pre-set to collect samples in a fixed scheme which is based in level and/or time or flow fixed boundaries set based on the previous knowledge of the river behavior. Unfortunately, a fixed scheme cannot respond for the variability of the future events, which may or may not be proper represented by the samples to be collected. This thesis presents a new dynamic approach for the process of triggering the taking of samples – an adaptive scheme capable of automatically making decisions based on the real time evolution of the events. In such approach the datalogger of a hydrologic station is programmed to perform comparative tests on the values of stage readings, in order to decide when to send a triggering signal for an automatic sampler for proceeding taking a sample. This new scheme was tested in a semi-urban river catchment with good results. Following that, a micro-processed automatic sampler was designed and produced to join together the intelligence and the collecting abilities in a single instrument. The new sampler was tested in the same hydrologic station with good results. The instrument was also tested in parallel with an automatic sampler set with a level triggered timed scheme. Results shown that the dynamic scheme produced a better match for the event mean turbidity, for the results obtained by analyzing the both sample collections were compared to automatic measurements taken each 150s during the events.

CAPÍTULO 1

Introdução

“I love my students because the more they study the more they become aware of how little they know”. – Susan Penneycad, 1999, in a personal talk, quoted from memory.

A situação dos rios urbanos brasileiros demanda atenção cuidadosa da sociedade civil e dos pesquisadores, pois o crescimento desordenado das cidades, associado à complexa dinâmica da atividade humana, impôs aos corpos hídricos uma carga poluidora que, em muitos casos, excede a capacidade de autodepuração, resultando na deterioração da qualidade das águas.

Entre as fontes poluidoras que contribuem para a degradação dos rios urbanos, os lançamentos diretos de esgoto e de efluentes industriais representam a parte visível do problema, e são classificados como lançamentos *pontuais*.

A experiência de países que já conseguiram atenuar as alterações de qualidade da água através do tratamento de efluentes e redução de seus lançamentos pontuais em corpos hídricos, mostra que existem também, outras fontes, não menos importantes, que contribuem para a amplificação da questão. São essas fontes difusas, que se destacam tanto pela difícil detecção de seus mecanismos de produção e transporte, quanto por seus efeitos bastante perceptíveis, que podem ser relacionados aos impactos que tendem a persistir em maior ou menor grau mesmo após o estabelecimento de controle rigoroso dos lançamentos diretos.

De acordo com a Agência Ambiental Norte Americana – USEPA – lançamentos pontuais são definidos como sendo “quaisquer transportes, discerníveis, confinados e discretos incluindo, mas não limitado a quaisquer tubos, valas, canais, túneis, poços, fissuras discretas, recipientes, materiais rodantes, operações de alimentação concentrada de animais, navios, ou outros flutuantes, a partir do quais os poluentes são ou podem ser descarregados. Esse termo não inclui descargas agrícolas provenientes de tempestades nem de fluxos de retorno de agricultura irrigada” (USEPA – *Clean Water Act*, 1972).

A primeira definição para poluição difusa decorre do próprio *Clean Water Act*, que considera não pontuais todas as fontes de poluentes que não se enquadrem na definição das fontes pontuais. Entretanto, o conceito de “qualquer outra coisa” é bastante incerto e abrangente o que motivou cientistas a buscar uma definição mais adequada.

Atualmente, considera-se que pode existir uma linha de distinção tênue entre as fontes de poluição pontuais e as difusas, dependendo da escala de interesse (LOAGUE e CORWIN (2005)). Para exemplificar essa afirmativa, esses autores apresentam o caso de uma área de plantio de 65 ha em uma bacia de centenas de milhares de hectares. A área em questão pode ser considerada uma fonte pontual de nitrogênio. Entretanto, na área de interesse, o fertilizante pode ser considerado como uma fonte não pontual devido à grande quantidade de material referente ao princípio ativo do ingrediente disperso na área. Por motivos como este, os autores afirmam que em última análise, a escala de referência determina se o poluente é proveniente de fontes pontuais ou não pontuais.

A importância do estudo de processos de poluição difusa, mais recentemente, foi detalhada por Novotny (2004). O autor afirma que mais da metade dos problemas de qualidade da água, que permanecem após a implementação de medidas para o tratamento de efluentes e remediação de fontes pontuais, são causados por fontes difusas. No entanto, questões relacionadas às medições e amostragens, envolvendo aspectos quali-quantitativos, ainda são um desafio para os pesquisadores.

Para alcançar maior conhecimento sobre os processos associados à poluição difusa, é necessário integrar cuidadosamente medidas de qualidade e quantidade de água, em especial em momentos nos quais existe maior chance de ocorrer o transporte dos poluentes para o interior do corpo hídrico – em eventos de chuva.

A efetiva medição da qualidade de água durante esses eventos, porém, representa um desafio a ser vencido. A aleatoriedade das chuvas impõe dificuldades consideráveis, tanto de ordem técnica quanto logística à coleta de amostras, uma vez que é necessário realizar medições de quantidade e qualidade da água ao longo de eventos que podem acontecer a qualquer momento e ter duração menor ou maior dependendo de condições, não necessariamente previsíveis.

Uma estratégia para abordar esta questão pode ser contemplada pela utilização de equipamentos automáticos de medição e de coleta de amostras de água em contraposição aos procedimentos com medições manuais.

Entretanto, utilização de equipamentos automáticos implica na determinação prévia das condições que, uma vez satisfeitas durante o evento, deflagrarão a coleta de amostras.

Dada a variabilidade temporal e de intensidade dos eventos de cheia que se deseja amostrar, a escolha de parâmetros de amostragem impõe limitações indesejáveis ao processo, não havendo garantias de que vários eventos sejam subamostrados. Para que isso ocorra basta que as características de duração ou intensidade desses eventos sejam diferentes das que foram utilizadas para estabelecer os parâmetros adotados.

1.1 JUSTIFICATIVA

A estimativa de carga de poluentes aportados por via difusa é baseada no conhecimento das concentrações destes poluentes durante o desenrolar dos eventos de cheia. Uma coleção de eventos bem amostrados é essencial para que se possa entender e estimar a carga anualmente aportada em um corpo hídrico.

Neste contexto, é necessário amostrar adequadamente a grande maioria dos eventos de cheia registrados ao longo do estudo para que se tenha uma maior confiança nos resultados obtidos.

As condições impõem o uso de amostradores automáticos mas, havendo limitações sérias em sua utilização, os estudos sobre poluição difusa podem ser prejudicados pela quantidade de eventos que venham a ser amostrados inadequadamente em função da variabilidade da intensidade e da duração dos eventos de cheia.

Nesta pesquisa, por conseguinte, foco é despendido no sentido de se sobrepor limitações de amostragem durante eventos de chuva, com o desenvolvimento de uma técnica de amostragem inovadora, adaptativa e inteligente, que permita o ajuste automático, em tempo real, dos parâmetros de amostragem.

Esta técnica, denominada Amostragem Inteligente, foi desenvolvida e testada com sucesso em campo com dois equipamentos diferentes. O primeiro deles construído por meio de adaptações realizadas em equipamentos convencionais disponíveis no mercado brasileiro. O segundo, por outro lado, trata-se de um equipamento dedicado e integralmente construído para realizar amostragem automática inteligente, o que o torna capaz de tornar mais simples a integração de medidas de qualidade e quantidade de água, potencializando uma nova perspectiva para o entendimento de processos hidrológicos e sua integração com as questões de alteração de qualidade da água.

1.2 HIPÓTESE

As evidências conceituais ligadas ao processo de poluição difusa requerem uma forma de monitoramento quali-quantitativo muito peculiar em função das características da natureza hidrológica, que, em geral, impõem questões operacionais de monitoramento muito específicas. Nesta pesquisa, propõe-se estabelecer condições tecnológicas para a comprovação da superioridade da amostragem inteligente em rio com características semi-urbanas, como mecanismo adequado para amostrar adequadamente a maioria dos eventos de cheia para, por meio deles, identificar o aporte de poluentes por via difusa e ampliar o entendimento de processos hidrológicos e de qualidade da água.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é o de estabelecer uma nova condição de monitoramento quali-quantitativo para avaliação de processos de poluição difusa, utilizando como estudo de caso uma bacia com características semi-urbanas. Para a consecução deste objetivo, apresenta-se como objetivos específicos:

- Revisar as práticas de amostragem utilizadas e apresentar as dificuldades a elas associadas;
- definir condições de “amostragem inteligente”, como forma de obtenção de amostras mais representativas para o estudo do transporte de poluentes por via difusa;
- montar um amostrador inteligente, programando um *datalogger* de alta performance e utilizando uma interface de comunicação especialmente desenvolvida para comandar um amostrador automático ISCO;
- testar o “amostrador inteligente” em um rio semi-urbano;
- projetar, construir e testar um amostrador baseado em tecnologia microprocessada, capaz de realizar a amostragem inteligente com vantagens operacionais e econômicas sobre o esquema Logger+ISCO;
- comprovar a eficiência e a superioridade da amostragem inteligente realizada pelos dois equipamentos frente aos processos convencionais de amostragem automática;
- obter dados quantificados sobre poluentes difusos, para vários eventos de cheia, em um rio semi-urbano, por meio da amostragem inteligente, de forma a iniciar um estudo amplo cujo objetivo é avaliar o aporte de poluentes por via difusa em um rio semiurbano.

1.4 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Para alcançar os objetivos propostos, uma revisão crítica da literatura existente é apresentada no capítulo 2, focada em conceitos fundamentais sobre poluição difusa, nas dificuldades inerentes à realização de estudos de fenômenos transitórios em rios, e à identificação dos equipamentos e práticas de amostragem mais comumente utilizadas nas pesquisas realizadas nesta área.

Adicionalmente, apresentam-se as principais funções disponíveis em amostradores automáticos existentes no mercado, com ênfase especial no aparelho produzido pela Teledyne Isco Inc., comumente denominado ISCO® no Brasil. A empresa, que é uma das

principais fabricantes de amostradores automáticos do mundo, tem presença forte no mercado brasileiro, motivo pelo qual seu produto será utilizado como exemplo para a discussão sobre formas de programação de amostradores automáticos e as limitações existentes no seu uso em estudos da poluição difusa (Kovacs, 2008; Panagopoulus, 2012).

Para ampliar esta análise, uma descrição detalhada dos Amostradores de Nível Ascendentes e Descendentes (ANAs e ANDs) é apresentada, sendo também discutidas as vantagens econômicas e desvantagens técnicas para a utilização desses equipamentos.

Uma questão relevante está associada às limitações existentes para a utilização do amostrador automático ISCO® em estudos de poluição difusa em bacias hidrográficas urbanas, evidenciando que essas dificuldades podem ser contornadas adequadamente apenas se o processo de amostragem de eventos transitórios puder ser conduzido com um grau de inteligência eletrônica superior ao existente atualmente.

Neste contexto, a amostragem inteligente é apresentada para contornar as dificuldades identificadas na utilização de amostradores automáticos em estudos de poluição difusa, sendo analisada e discutida.

Este método avançado de amostragem foi implementado e testado com sucesso em uma bacia experimental, por meio da associação das funções disponíveis em um amostrador convencional às funções existentes no *datalogger* de uma estação hidrométrica. Uma placa de comunicação foi desenvolvida para acoplar os dois equipamentos.

Com base no sucesso obtido na aplicação do método da amostragem inteligente, foi desenvolvido um novo amostrador, denominado SBN, que é dotado de tecnologia microprocessada. O SBN foi desenvolvido para viabilizar a aplicação da amostragem inteligente de maneira mais ampla, segura e econômica. O equipamento foi testado com sucesso, operando em paralelo com o amostrador inteligente composto pelo ISCO + Datalogger.

A validação do ganho de eficiência do processo de amostragem inteligente foi feita por comparação entre os resultados obtidos das análises realizadas em inúmeras amostras coletadas e as leituras de um sensor automático de Turbidez instalado na estação na mesma data em que o segundo amostrador inteligente foi montado.

No processo de validação, para cada evento foi calculada a turbidez média, obtida a partir de ao menos duas das alternativas abaixo:

- a) resultado de análises efetuadas nas amostras coletadas pelo amostrador inteligente composto pelo ISCO – LOGGER (máximo de 24 amostras);
- b) resultado de análises efetuadas nas amostras coletadas pelo amostrador inteligente SBN (máximo de 12 amostras em sua versão protótipo);

- c) resultado de um grande número de leituras automáticas efetuadas pelo sensor ao longo do evento. (24 leituras para cada hora de duração do evento) – resultado este utilizado como referência de comparação;
- d) resultado de um número limitado de leituras do sensor, tomadas em intervalos regulares de tempo (no máximo 24 leituras, para simular 24 coletas que seriam efetuadas por um amostrador automático ajustado para fazer coletas temporizadas);
- e) resultado de análises efetuadas em amostras coletadas pelo amostrador ISCO, regulado para coletar em intervalos de 2 em 2 horas (máximo de 24 amostras).

A Figura 1.1 apresenta, de maneira sucinta, o roteiro seguido para o desenvolvimento, implantação e validação da Amostragem Inteligente como sendo a melhor alternativa para a coleta de amostras em estudos que buscam quantificar o aporte de poluentes difusos em rios.

Um histórico do desenvolvimento de uma série de amostradores integrados ANA-AND, dotados de comandos eletrônicos simples, denominados SBs, é apresentado em anexo. A sua função é permitir estudos de poluição difusa em rios urbanos e suas características construtivas, vantagens e as limitações, com estudo de caso para a Bacia do Rio Barigui (BRB), na Região Metropolitana de Curitiba.

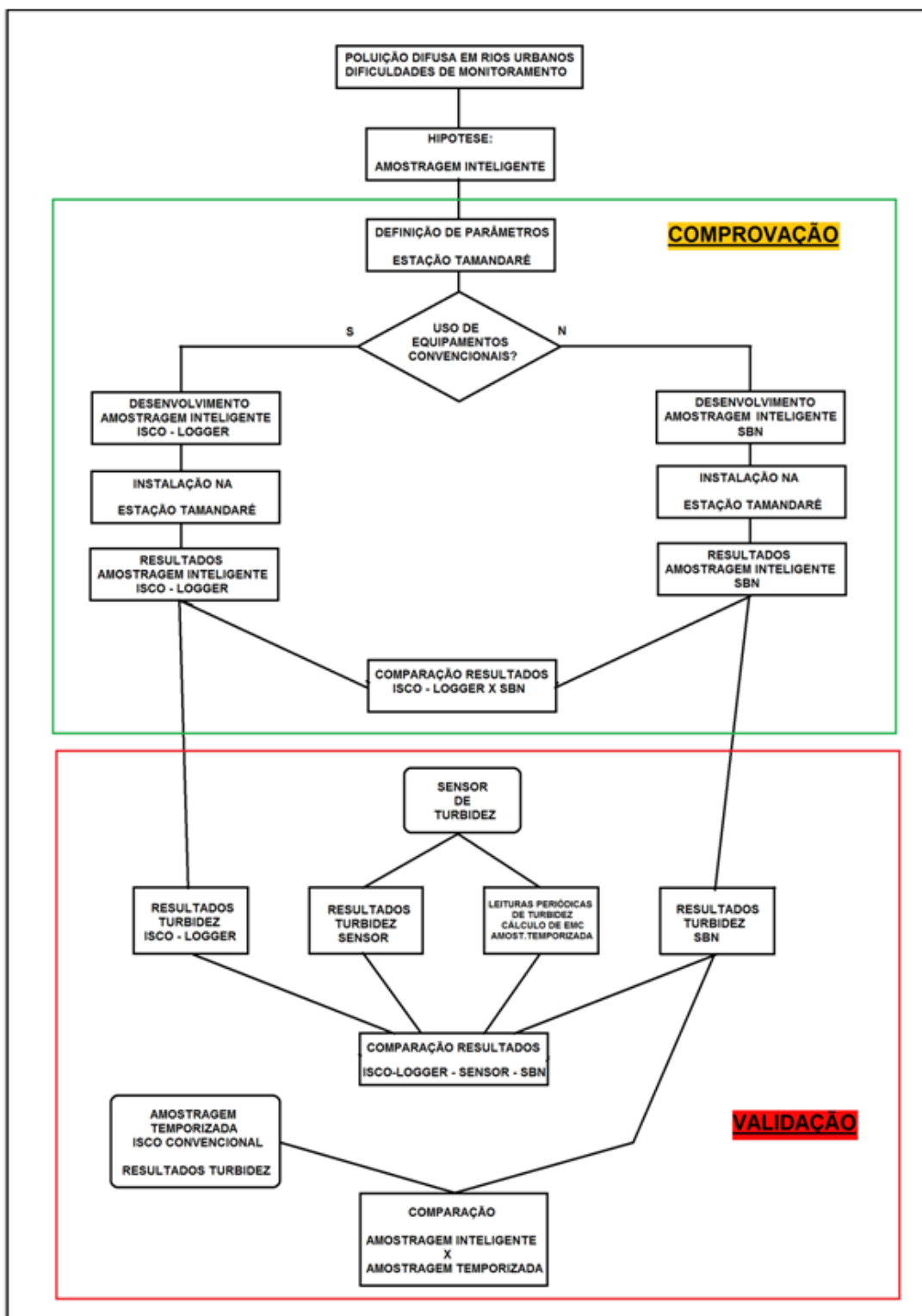


Figura 1.1 – Esquema de Desenvolvimento da Tese

1.5 CONTRIBUIÇÃO DA TESE

Este documento busca apresentar soluções para as dificuldades inerentes ao processo de amostragem automática de eventos de interesse em estudos de poluição difusa. As principais contribuições desta pesquisa estão a seguir indicadas.

- o desenvolvimento de um método de amostragem inteligente, capaz de decidir sobre quando e como coletar amostras em uma seção da bacia hidrográfica;
- o desenvolvimento de uma plataforma eletrônica inteligente, capaz de executar a metodologia proposta, a partir de equipamentos convencionais como um amostrador automático ISCO® e um *datalogger*, existentes em uma estação hidrométrica automática;
- a comprovação prática do funcionamento da plataforma inteligente em uma bacia experimental, na qual ficou demonstrado que o método de amostragem inteligente torna possível o um bom registro do transporte de poluentes ao longo de eventos de cheia;
- o desenvolvimento de um módulo de comando microprocessado, capaz de executar plenamente, e com algumas vantagens, o método que foi testado com sucesso na plataforma ISCO®-*datalogger*, para que seja possível dotar os amostradores da série SB com capacidades operacionais de alta performance;
- O desenvolvimento de um equipamento amostrador de alta performance e baixo custo, necessário aos estudos de poluição difusa em rios brasileiros.

1.6 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está organizada em 8 capítulos.

No **Capítulo 2 – Poluição Difusa em Rios Urbanos e as Dificuldades de Monitoramento**, são apresentadas referências bibliográficas, evidências de interesse, conceitos, processos de medição e estimativa de carga de poluentes, e os equipamentos mais utilizados em amostragem automática. Também é apresentada, como estudo de caso, a Bacia do Rio Barigui, onde são testadas as metodologias e equipamentos desenvolvidos nesta teste.

No **Capítulo 3 – A Variável Hidrológica Dinâmica**, é introduzido o conceito de um novo método de amostragem – denominado Amostragem Inteligente, baseado na avaliação dinâmica do comportamento de uma variável hidrológica. O método é proposto para permitir um melhor aproveitamento da amostragem de um evento. O dimensionamento dos

parâmetros de amostragem para o caso da Estação Tamandaré, na Bacia do Rio Barigui é desenvolvido a partir da série da estação para demonstrar, por meio de exemplo, o novo conceito da amostragem. São apresentadas também a plataforma ISCO – *logger*, as características da interface que foi especialmente desenvolvida para permitir a comunicação entre o *datalogger* e o ISCO, e os detalhes da instalação na Estação Hidrológica Tamandaré, na BRB.

No **Capítulo 4 – Amostragem Automática Inteligente com o uso do Nivel como Variável Hidrológica Dinâmica – A Amostragem Inteligente**, é apresentado o desenvolvimento da técnica da amostragem inteligente realizada a partir da associação do datalogger da estação, programado para comandar a amostragem inteligente, a um amostrador automático ISCO. Resultados da amostragem inteligente realizada pelo conjunto ISCO-LOGGER são apresentados, sendo discutidas as vantagens da aplicação desta técnica

No **Capítulo 5 – O Amostrador Microprocessado SBN**, é apresentado o desenvolvimento integral de um amostrador microprocessado, capaz de realizar, com vantagens, a amostragem inteligente. No SBN foram implementadas todas as funções testadas na plataforma ISCO-LOGGER. O aparelho foi montado e testado na Estação Tamandaré, em paralelo com o amostrador inteligente ISCO-LOGGER. Resultados comparativos da amostragem inteligente realizada pelos dois aparelhos são apresentados e discutidos.

O **Capítulo 6 – Validação da Amostragem Inteligente pela Comparação com Medidas de Turbidez** apresenta a base teórica e os resultados práticos da validação da amostragem inteligente, feita pela comparação entre resultados da turbidez média dos eventos obtidos a partir das amostras coletadas e os valores obtidos a partir de leituras automáticas de turbidez realizadas a cada 150 segundos.

No **Capítulo 7 – Resultados** são apresentados e discutidos resultados da amostragem efetuada ao longo de 15 meses na estação Tamandaré. São apresentados em três fases, sendo a primeira referente à amostragem inteligente realizada pelo ISCO-LOGGER, a segunda realizada pelos amostradores ISCO-LOGGER e SBN, ambos realizando amostragens inteligentes e, por último, com o SBN realizando amostragem inteligente em paralelo com o amostrador ISCO realizando amostragem temporizada.

O **Capítulo 8 – Conclusão** apresenta conclusões e recomendações deste trabalho.

CAPÍTULO 2

Poluição Difusa em Bacias Urbanas e as Dificuldades de Monitoramento

“Today’s Scientists have substituted mathematics for experiments, and they wander off through equation after equation, and eventually build a structure which has no relation to reality”, Nikolas Tesla

2.1 FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão introduzidos e definidos quatro conceitos fundamentais para este estudo: poluição difusa, eventos, concentração média do evento e separação do escoamento superficial.

2.1.1 Poluição difusa

A poluição difusa é definida, originalmente, por exclusão. O principal instrumento legal é o *Clean Water Act*, no qual são definidas as fontes pontuais de poluentes para rios e lagos nos Estados Unidos da América, sendo consideradas *não pontuais* todas as fontes que não se enquadrem na lista de fontes pontuais contida no documento. O termo *non point source pollution* decorre deste instrumento e é mais comumente utilizado nos Estados Unidos (NOVOTNY, 2008).

O termo poluição difusa significa exatamente o mesmo que poluição não pontual, e refere-se a poluição cuja fonte não pode ser imediatamente relacionada a um ponto específico de contribuição, mas cujos efeitos são observáveis e passíveis de quantificação.

Existe, atualmente, a aceitação de que em alguns casos a definição entre fonte difusa ou pontual depende da escala de observação. Se um estudo buscar quantificar a contribuição decorrente da aplicação de defensivos agrícolas em parcela considerável de uma bacia hidrográfica de poucos hectares, o mecanismo de transporte dos resíduos dos defensivos para águas locais não pode ser caracterizado como pontual sendo, portanto,

difuso. Entretanto se o foco do estudo for bacia bem maior, da qual a primeira seja tributária, a contribuição poderá ser considerada pontual, se representar apenas uma pequena fração da área total em estudo.

Entretanto, os estudos sobre poluição difusa foram desenvolvidos a partir de processos de monitoramento convencional, muitas vezes realizados em bacias hidrográficas com áreas de poucos hectares para facilitar o controle e a amostragem.

Equipamentos automáticos para coleta de amostras como o ISCO, que surgiram no mercado para preencher demandas de monitoramento em estações de tratamento de efluentes, passaram a ser ferramentas importantes, mas a produção de amostras pelos mecanismos de temporização disponíveis no aparelho podem não ser totalmente adequados às necessidades dos estudos em poluição difusa. É possível que, em virtude das dificuldades observadas no estabelecimento de parâmetros de amostragem, a utilização de processos temporizados não necessariamente venha a conduzir a uma desejada melhor compreensão dos processos de formação e transporte de poluentes difusos nos corpos hídricos.

2.1.2 Eventos

O transporte de poluentes por via difusa para dentro de corpos aquáticos ocorre, predominantemente, durante eventos de precipitação que apresentem intensidade suficiente para, ao exceder a capacidade de absorção do solo, provoquem a formação do escoamento superficial.

O escoamento superficial procede a lavagem da superfície da bacia hidrográfica, carreando poluentes acumulados na bacia desde a lavagem anterior. O termo em inglês para o processo de acúmulo de poluentes é *build up*, e refere-se ao tempo em que ocorre a acumulação progressiva de poluentes por sobre a superfície das bacias hidrográficas. O termo *washoff* corresponde à lavagem dos poluentes acumulados para dentro dos corpos hídricos.

Como estes processos apenas acontecem durante a ocorrência de chuvas cuja intensidade seja suficiente para provocar o escoamento superficial, é importante definir estes fenômenos como eventos de interesse.

Assim, para efeitos desta tese, **Eventos** são definidos como situações nas quais a intensidade da precipitação provocou o escoamento superficial e este escoamento induziu um súbito e detectável aumento da vazão dos rios.

Dentro deste contexto, consolidam-se as limitações associadas ao monitoramento quali-quantitativo que permita estabelecer as bases para o entendimento dos processos que produzem indícios de poluição difusa, como apresentado por Collins (2008). O desafio de propor um sistema de monitoramento que permita esclarecer estas questões ainda é um desafio de pesquisa. A contextualização de explorar uma amostragem que seja associada às condições impostas por eventos ainda não é claramente apresentada na literatura, permanecendo aberta, portanto, uma oportunidade de conexão e desenvolvimento tecnológico que subsidie o entendimento de processos e mecanismos associados à poluição difusa.

2.1.3 Concentração Média do Evento

O desafio de se mensurar a quantidade de poluentes transferida para a massa líquida dos rios durante a ocorrência de eventos é tarefa complexa. É necessário o conhecimento da vazão e das concentrações dos diversos poluentes que estão sendo transportados através de uma seção de controle, considerando a sua dinâmica temporal integrada com a resposta do sistema na seção de controle.

Como para a maioria dos parâmetros importantes no controle da poluição das águas ainda não existem sensores confiáveis e economicamente viáveis que possam oferecer leituras contínuas para parâmetros como a Demanda Química de Oxigênio, a Demanda Biológica de Oxigênio, a Condutividade, o pH e para as concentrações de metais pesados, apenas para citar os mais importantes, a estratégia de mensuração é baseada na coleta de amostras durante o evento e na realização posterior de análises laboratoriais.

A turbidez é uma exceção, posto já ser possível obter leituras confiáveis de sensores óticos que, dotados de dispositivos de auto-limpeza, produzem bons resultados (LEWIS e EADS, 2009).

Para o estabelecimento da quantificação dos poluentes, durante a ocorrência dos eventos, avalia-se a condição instantânea do rio através do registro da quantidade e da qualidade para o cálculo da **concentração média do evento (EMC)**, que é a média ponderada das concentrações das amostras coletadas (Eq 1) durante a ocorrência do Escoamento Superficial, e apresentada a seguir:

$$EMC = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i C_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (1)$$

Para que um bom resultado seja obtido, as amostras precisam ser coletadas em número suficiente e nos instantes mais adequados para representar o evento. No que concerne ao impacto do registro contínuo de informações de qualidade da água, uma vez conhecidos os valores instantâneos para a turbidez e para vazão, é possível obter, com uma boa exatidão, os valores para a turbidez média dos eventos, bastando para tal calcular médias ponderadas para os eventos.

Isto posto, define-se a carga transportada através da seção de controle como sendo o produto da **concentração média do evento (EMC)** pela **Vazão Total do Evento**. O valor é usualmente expresso em unidades de massa (kg ou ton) por evento.

2.1.4 A Separação do Escoamento Superficial

Um dos aspectos conceituais interessantes em hidrologia e sua integração para o entedimento de processos de poluição difusa, está no esforço em se entender os mecanismos de aporte de cargas durante episódios pluviais. Dentro deste contexto, é importante separar, durante os eventos, o escoamento de base do escoamento superficial.

Embora as questões relativas a separação do escoamento superficial sejam conhecidas, com a definição de distintas técnicas, como as apresentadas por Arnold e Allen (1999), Wittenberg e Sivaplan (1999) e Rutledge (1998), a análise dos processos de poluição difusa ainda está limitada à forma de obtenção de informações de qualidade da água. Mesmo assim, busca-se correlacionar o transporte de poluentes ao escoamento superficial, para permitir uma melhor comparação entre os eventos.

Em teoria, quando é formado o escoamento superficial em decorrência da saturação do solo pela intensidade da precipitação, as primeiras águas que se deslocam pela superfície da bacia em direção ao corpo receptor carregam uma concentração maior de poluentes, uma vez que estão lavando os poluentes que se acumularam na bacia durante o período de estiagem.

Na prática, entretanto, o fenômeno é elusivo, pois sua caracterização depende da coleta de amostras logo no começo da ascensão do hidrograma do evento, tarefa que pode ser de difícil execução.

A comparação entre eventos, então, não dependerá apenas da boa aplicação da técnica adotada para a separação do escoamento superficial, mas, fundamentalmente da qualidade do processo de amostragem.

2.2 MEDIÇÃO E MONITORAMENTO EM POLUIÇÃO DIFUSA

O aporte de poluentes em corpos hídricos por meios pontuais, tipicamente exemplificado por canais de lançamento de efluentes industriais, pode ser mensurado diretamente nos pontos de lançamento. Para isso, a vazão (m^3/s) líquida do lançamento e a concentração (mg/L) do poluente de interesse devem ser adequadamente determinadas. Uma vez conhecidas estas características é possível estabelecer a carga (kg/dia) do poluente lançada ao longo do intervalo de tempo desejado.

No caso de poluentes transportados por via difusa, a aplicação deste método de cálculo da carga poluidora é particularmente dificultada pela ausência de pontos de lançamento, o que força a transferência das medidas para o interior do corpo hídrico e um olhar mais crítico sobre a influência dos processos hidrológicos.

Ao contrário dos lançamentos pontuais, nos quais os poluentes são transportados por uma vazão líquida mensurável, que pode ser contínua ou intermitente dependendo do processo de produção, os poluentes que aportam os rios por via difusa são transportados preferencialmente durante a ocorrência de eventos de chuvas com intensidade suficiente para provocar escoamento superficial. É por meio deste escoamento que os poluentes acumulados por sobre a superfície da bacia hidrográfica são transportados para os rios.

Como não há como medir a vazão do escoamento superficial e a concentração de poluentes nela contida, o foco da medição é transferido para o próprio rio, no qual se procura observar os efeitos provocados pelo aporte de poluentes difusos carregados para o corpo hídrico.

Esta mudança implica na introdução de várias incertezas no cálculo da carga difusa, como, por exemplo:

- a medida da vazão de rios é, geralmente, mais complexa e menos precisa que a medida das vazões dos canais artificiais ou das tubulações a partir das quais são lançados efluentes ou esgotos;
- a medida da concentração de poluentes, quando realizada diretamente em um rio, deve considerar a variabilidade espaço-temporal e as condições de mistura influenciada pelas características turbulentas de escoamento.
- o monitoramento deve ser realizado durante o desenrolar do evento, ou seja, durante o episódio pluvial com intensidade suficiente para, ao provocar o escoamento superficial, promover o transporte de poluentes para o interior dos corpos aquáticos.

Um aspecto importante é o conhecimento do regime hidrológico de um rio para permitir adequadas medidas de vazão. Assim, a escolha adequada do local a ser monitorado poderá diminuir consideravelmente a incerteza associada aos dois primeiros itens.

Por outro lado, a ocorrência, a intensidade e a duração das chuvas são algumas das variáveis aleatórias das quais depende a intensidade do aporte de poluentes aos rios por mecanismos difusos, sendo necessário registrar a variação da concentração de poluentes nos rios quando o escoamento superficial proporcionar o carreamento de poluentes.

Por esse motivo, a análise da carga de poluentes carregada aos rios por via difusa é predominantemente realizada tendo por base os eventos aleatórios de cheia provocados pela ocorrência de chuvas (FERRIER *et al.*, 2005).

Como as chuvas apresentam um comportamento aleatório, e esta característica reflete-se na vazão dos rios, o estudo do carreamento de poluentes distribuídos na superfície da bacia por meio do escoamento superficial é complexo e depende de uma efetiva caracterização dos eventos tanto sob o ponto de vista hídrico quanto de poluição. Assim, torna-se necessário coletar amostras ao longo dos eventos para que seja possível correlacionar a intensidade da precipitação, a intensidade do escoamento resultante, o tempo decorrido desde a última precipitação e as concentrações de poluentes encontradas nas amostras coletadas durante o evento (JUNG *et al.*, 2008).

As concentrações dos poluentes variam consideravelmente ao longo de um mesmo evento. O aumento da concentração pode decorrer de uma lavagem inicial da superfície da bacia hidrográfica, enquanto o efeito contrário pode ser o resultado da diluição provocada pelo aumento da vazão, o que dificulta a caracterização dos eventos no tocante aos impactos da poluição.

Como eventos nunca se repetem exatamente da mesma forma, a maneira pela qual se busca quantificar a carga total de poluentes que são aportados por via difusa consiste em calcular a **concentração média do evento** (event mean concentration - EMC), e multiplicá-la pela vazão total do evento.

$$Carga\ Total = EMC * Vazão\ Total = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i C_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} * \int_0^t Q dt \quad (2)$$

Em função de cada evento e para que seja possível comparar eventos em função de seus efeitos sobre a poluição, a aplicação da Equação 2 permite determinar um valor para a carga total de poluentes transportada para o interior dos corpos hídricos. A comparação é realizada levando-se em conta a intensidade e a duração da precipitação, o

intervalo seco, a vazão máxima e a duração do evento. Entretanto, a determinação da EMC é dificultada pelo custo das análises e pelo próprio processo de amostragem (HARMEL *et al.*, 2003).

O procedimento ideal para se obter o valor da EMC consiste em utilizar sensores automáticos capazes de registrar as concentrações dos diversos poluentes ao longo dos eventos, de forma a integrar as concentrações às vazões registradas nas estações hidrométricas. Entretanto, a tecnologia de aquisição de informações automáticas de qualidade de água ainda não oferece confiabilidade necessária, o que impõe a coleta de amostras para análise posterior em laboratório (BRAGA, 2005).

Em função do custo para se analisar amostras e caracterizar todos os eventos que ocorrem em um determinado rio, o processo de cálculo da carga poluente anual é realizado por semelhança de eventos. Também é comum que se calcule um valor médio para o EMC (EMC_m) para possibilitar a estimativa das cargas anuais de poluentes tomando-se por base o número de eventos de um ano. Deve ser considerado que o padrão anual de distribuição de eventos de diferentes intensidades não apresente grande variação. De acordo com Maniquiz *et al.*, (2010), chuvas intensas e de curta duração, com pequeno volume precipitado, tendem a produzir concentrações médias maiores que chuvas com grande volume precipitado.

Como a distribuição dos diferentes eventos ao longo dos anos geralmente não é uniforme torna-se necessário atribuir pesos e ponderar as categorias de eventos para que se obtenha um valor mais apropriado para o EMC_m , o que deve ser realizado individualmente para cada seção (SIMPSON e STONE, 1988).

Para o cálculo do EMC ainda existe uma dificuldade extra, que consiste em realizar a caracterização mais adequada possível para o fenômeno da lavagem inicial (*first flush*). Segundo Sansalone e Cristina (2004), o termo *first flush* foi introduzido em 1916, por Metcalf e Eddy, para descrever a maior concentração de poluentes que é transportada para os rios logo no início do escoamento superficial. O assunto causava grande preocupação em função da grande quantidade de material fecal equino que era "lavado" das ruas e carregado aos rios.

Passado quase um século, a modernização dos meios de transporte eliminou o material fecal, mas introduziu novos poluentes como os materiais particulados que são gerados a partir do desgaste de pneus, das pistas de rolagem e dos componentes metálicos dos motores de combustão interna, os quais são acrescidos dos resíduos de óleos e graxas (SANSALONE e CRISTINA, 2004). Estes poluentes que se acumulam nas ruas justificam a necessidade da caracterização adequada da lavagem inicial.

Entretanto, o registro deste fenômeno depende da realização da amostragem logo no início de eventos que produzam escoamento superficial, ou seja, imediatamente após

observada a elevação de nível no corpo hídrico receptor. A realização destas coletas, por meio de amostradores automáticos, é tarefa de difícil execução (SUAREZ e PUERTAS, 2005), o que torna a caracterização da lavagem inicial problemática.

De acordo com Sansalone e Cristina (2004), atualmente existem duas formas para a caracterização da lavagem de poluentes. A mais comum, e amplamente utilizada, é identificada pela sigla em Inglês: CBFF – *concentration based first flush* – lavagem de poluentes por concentração. Esta forma é mais simples de ser compreendida pois decorre de observação direta do aumento da concentração do poluente durante a ascensão do hidrograma.

Entretanto, esta abordagem apresenta uma desvantagem visual. Para descrevê-la corretamente, é necessária a superposição do hidrograma e da curva das concentrações do poluente que se deseja analisar. Como existe uma dependência direta entre a concentração e os volumes que estão sendo transportados, existirá sempre a possibilidade do efeito de lavagem ser mascarado pelo aumento da vazão, o que poderia produzir uma redução da concentração de poluentes, como no caso apresentado na Figura 2.1.

Outra abordagem, identificada pela sigla MBFF – *mass-based first flush*, permite a análise gráfica da evolução da descarga da massa de poluentes quando comparada com a evolução da descarga dos volumes de água, através de uma seção de controle, para um mesmo evento, conforme pode ser observado na Figura 2.2.

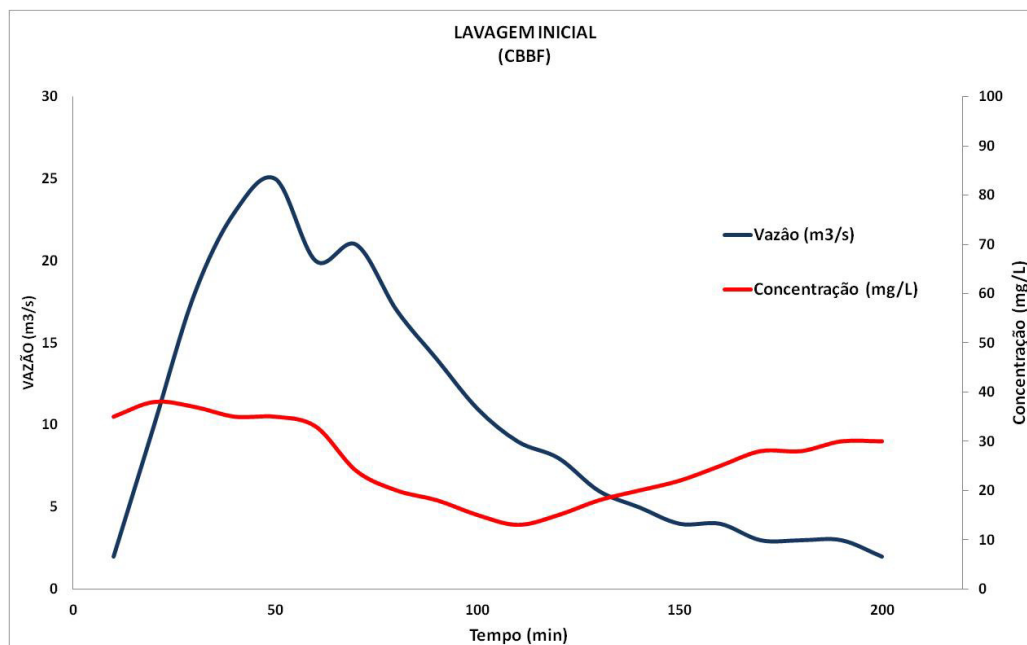


Figura 2.1 – Aspectos conceituais de Lavagem Inicial (CBBF)

Fonte: adaptado de Sansalone e Cristina (2004)

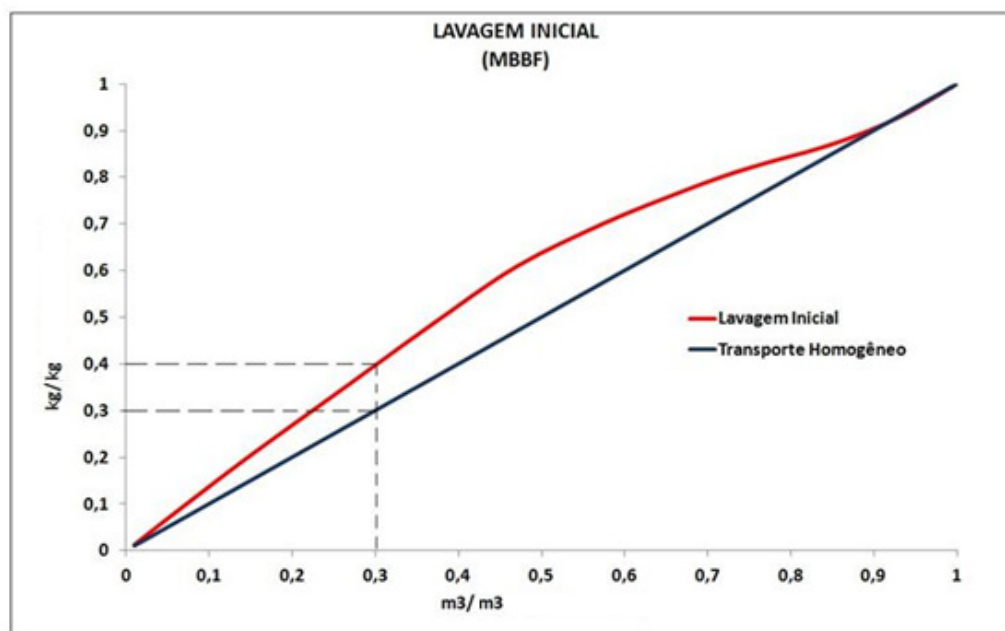


Figura 2.2. – Lavagem Inicial Proeminente (MBBF)

Fonte: adaptado de Sansalone e Cristina (2004)

Na Figura 2.2, a reta representa o transporte homogêneo, pois ao longo do evento, a proporção de massa de poluentes transportada através da seção é idêntica à proporção do volume escoado. No caso de haver um processo de lavagem de poluentes, torna-se mais simples observar, neste tipo de representação, que a proporção da massa de poluentes é maior que a proporção do volume transportado ao longo do evento. Neste caso, quando 30% do volume total do evento tiver passado pela seção de controle, 40% do total da massa de poluentes do evento já terá passado, o que facilita a observação da lavagem inicial.

Os conceitos apresentados nesta seção, EMC, EMC_m e a Lavagem Inicial introduzem mas não esgotam as dificuldades associadas ao tema, que serão aprofundadas nas próximas seções.

2.3 ESTIMATIVA DE CARGA EM TRECHOS DE RIOS URBANIZADOS

O estudo do efeito das fontes difusas de poluentes sobre as bacias hidrográficas urbanas ainda representa um desafio para os pesquisadores. Ao contrário do que ocorre em bacias hidrográficas rurais, nas quais as fontes de poluentes podem, em alguns casos, serem estimadas pela obtenção de dados sobre a aplicação de defensivos agrícolas e outros poluentes, a determinação da matriz de fontes de poluição difusa em ambiente urbano é mais complexa (ELLIS e MITCHELL, 2006). Portanto, as questões básicas de uma estratégia de monitoramento como: o que medir, como medir, quando medir, por que medir, ganham uma dimensão conceitual muito mais complexa daquela utilizada em situações onde as fontes pontuais são as mais relevantes (DELETIC, 1998; ELLIS e MITCHELL, 2006; MITCHELL, 2005; ELLIS e REVITT, 2008; DAVIS e BIRCH, 2009).

Por exemplo, substâncias orgânicas, sistemas de esgotamento sanitário sem tratamento, lançamento de resíduos automotivos e industriais, destacam-se entre tantos outros resíduos das inúmeras atividades humanas existentes em grandes centros urbanos, e tornam difícil a estimativa dos aportes de poluentes aos rios que cortam as cidades. Entretanto, é possível contornar dificuldades como estas pelo monitoramento direto da qualidade da água em trechos de rios urbanizados. Se forem conhecidas as vazões, ao se efetuar a determinação das concentrações, torna-se possível estimar as cargas de poluentes que estão sendo aportadas aos rios, dada a evolução da química analítica na identificação de traços de resíduos

Os programas de monitoramento regular, quando bem planejados, são capazes de produzir estimativas médias confiáveis, principalmente se o processo de amostragem for conduzido ao longo de anos, de forma que seja possível estabelecer uma série histórica de

concentrações de poluentes que possa ser associada à série histórica de vazões de uma determinada seção de medição. Este processo, entretanto, não produz uma informação completa (ROBERTSON e ROERISH, 1999).

Adicionalmente, os processos de transporte de poluentes associados à lavagem de superfícies, e a consequente transferência dos poluentes distribuídos na área de drenagem para o interior dos corpos hídricos quando da ocorrência do escoamento superficial, não podem ser plenamente quantificados por leituras regulares da vazão e da concentração de poluentes. O motivo decorre do próprio acúmulo de poluentes na superfície da bacia hidrográfica urbana, acúmulo este que pode produzir uma “água de lavagem” que apresenta concentrações elevadas de poluentes quando ocorrem precipitações mais intensas (LÉON *et al.*, 2001).

Essas águas de lavagem, associadas ao início da subida do hidrograma, que produzem o fenômeno denominado primeira lavagem, são o principal mecanismo de aporte de poluentes por via difusa em rios. Claramente, se evidencia, a relevância da dinâmica hidrológica no impacto dos processos de poluição difusa de uma bacia.

De acordo com a Agência Ambiental Americana, existiam estimativas indicando que a poluição difusa era a principal responsável pela não conformidade de cerca de 40% dos rios e lagos americanos em relação aos padrões de qualidade da água (USEPA, 1991). Novotny (2004) complementa afirmando que “mais da metade dos problemas de qualidade da água, que permanecem após a implementação de medidas para o tratamento de efluentes e remediação de fontes pontuais, são causados por fontes difusas”, a situação é compatível com a observada em outros países (SIMPSON e STONE, 1988).

Por si só, a possibilidade de parte importante da carga poluidora de uma bacia hidrográfica ser originária de fontes difusas justifica a necessidade de estudos mais aprofundados. Entretanto, motivos técnicos e econômicos dificultam sua realização no Brasil, pois:

- a lavagem de poluentes pode ser de difícil detecção, dada a necessidade de se realizar coletas logo no início da ocorrência dos eventos de cheia;
- para que o cálculo do EMC de qualquer poluente possa ser realizado adequadamente, é necessária uma boa distribuição da amostragem ao longo do desenrolar do evento.

Este tipo de monitoramento, dificilmente pode ser realizado sem que sejam utilizados mecanismos automáticos de coleta, dados os custos de manutenção de uma equipe preparada para realizar a amostragem nos locais de interesse.

A utilização de equipamentos automáticos impõe novos custos ao processo de amostragem e impõe a busca de um equilíbrio entre os recursos disponíveis e os objetivos a serem alcançados.

No caso dos estudos em áreas rurais, a escolha de bacias cuja área não exceda uns poucos hectares – mais fácil de equipar - é um dos fatores que auxiliam na obtenção deste equilíbrio. Como os poluentes – defensivos agrícolas, insumos e pesticidas, apresentam comportamento mais conhecido, sendo viável inclusive, em muitos casos, conhecer aproximadamente as quantidades aplicadas na região em estudo, é possível utilizar os resultados obtidos para inferir o comportamento de bacias maiores se o processo for feito com algum cuidado (HEATWAITE, 2002).

Em bacias urbanas, por outro lado, a situação é mais difícil, pois a diversidade da ocupação do solo, das atividades econômicas, da renda da população, da disponibilidade e qualidade dos serviços de saneamento, entre outros fatores, ampliam a diversidade e as quantidades individuais de poluentes passíveis de serem determinados.

Com tantas possibilidades de variação, torna-se difícil inferir resultados obtidos em bacias urbanas de poucos hectares para bacias maiores, o que impõe custos de monitoramento mais altos e torna raros os estudos de poluição difusa em bacias urbanas e mais crítica a definição das estratégias de amostragem.

Dificuldades como estas só podem ser contornadas pela utilização de amostradores automáticos, que possam realizar a coleta de amostras de água nas situações desejadas.

2.4 AMOSTRADORES AUTOMÁTICOS

Existem vários equipamentos profissionais, que podem ser adaptados para realizar as amostragens necessárias aos estudos da poluição difusa. O mais utilizado entre eles – e que de alguma forma é considerado como referência para outros modelos – é fabricado pela empresa norte-americana TELEDYNE-ISCO® (Figura 2.3) (STUTTER *et al.*, 2008; OCKENDEN *et al.*, 2012; GASTALDINI e SILVA, 2013). Este sistema é composto por uma estação de bombeamento, acionada por um módulo de comando eletrônico que pode ser programado para realizar séries de tarefas específicas necessárias ao monitoramento (TELEDYNE-ISCO, 2011).



Figura 2.3 – Amostrador automático ISCO®

O equipamento pode ser dotado de até 24 garrafas de coleta com capacidade individual de um litro ou, alternativamente, uma única garrafa de vinte litros. Em ambos os casos o equipamento pode ser programado para preencher o volume das garrafas em uma única operação produzindo amostra simples, ou em uma série de acionamentos, assim produzindo amostras compostas.

O disparo das coletas pode ser realizado por intervalo de tempo ou por intervalos de nível que representem as vazões adequadas ao estudo, obtidas por meio da curva chave. Em ambos os casos é necessário um estímulo externo que fará o aparelho iniciar o processo de amostragem. Uma das alternativas adotadas é programar o aparelho para iniciar seu ciclo de coleta a partir de patamar de nível mínimo de água do rio. Outra possibilidade importante consiste em iniciar o processo de amostragem a partir de informações produzidas por um pluviômetro.

Uma vez iniciado o ciclo de coleta, o equipamento seguirá sua programação, efetuando coletas automaticamente nos intervalos de tempo predeterminados ou no momento em que o nível do rio alcançar os valores pré-programados.

Embora apresente capacidades operacionais importantes, a utilização de amostradores automáticos pode não atender completamente as necessidades da pesquisa em poluição difusa.

Harmel *et al.*, (2002), avaliando a amostragem automática durante eventos de cheia em pequenas bacias hidrográficas, entre 6 e 67 ha, chamam a atenção para a possibilidade de erros de grande significado (até 50%) causados pelo estabelecimento de um patamar elevado para o nível (com vazões acima de 0,04 m³/s) a partir do qual será iniciado o processo de amostragem. Segundo os autores, os equipamentos de coleta devem ser programados de forma que mesmo um pequeno aumento da vazão cause o acionamento do sistema, para evitar que se deixe de coletar amostras importantes para a caracterização da lavagem de poluentes.

Um exemplo típico de erro que poderia ser gerado pelo descumprimento dessa regra pode ser observado comparando-se as Figuras 2.4 e 2.5, adaptadas de Harmel *et al.*, (2003). Estas figuras apresentam as respostas para diferentes amostragens realizadas para um mesmo evento, e o consequente impacto no cálculo da carga acumulada, que nas figuras é representada pela área em amarelo. Em ambos os casos, a amostragem foi realizada em intervalos regulares de tempo, representados na figura pela linha tracejada horizontal. O processo é iniciado quando o nível da água do rio alcança o patamar de nível desejado, o mesmo utilizado para interromper a coleta quando da recessão.

No caso da Figura 2.4, a adoção de um patamar de nível inicial muito elevado resulta no registro de carga total menor. Ao iniciar a amostragem, quando o hidrograma encontra-se em plena ascensão, perde-se o registro do início do evento e, como o equipamento costuma ser programado para interromper a amostragem uma vez que o nível retorne a um patamar inferior ao inicial, perde-se também o registro do final do evento.

Ao adotar um patamar de nível de disparo menor, a carga total registrada seria mais elevada, o que é representado pela área marcada da Figura 2.5.

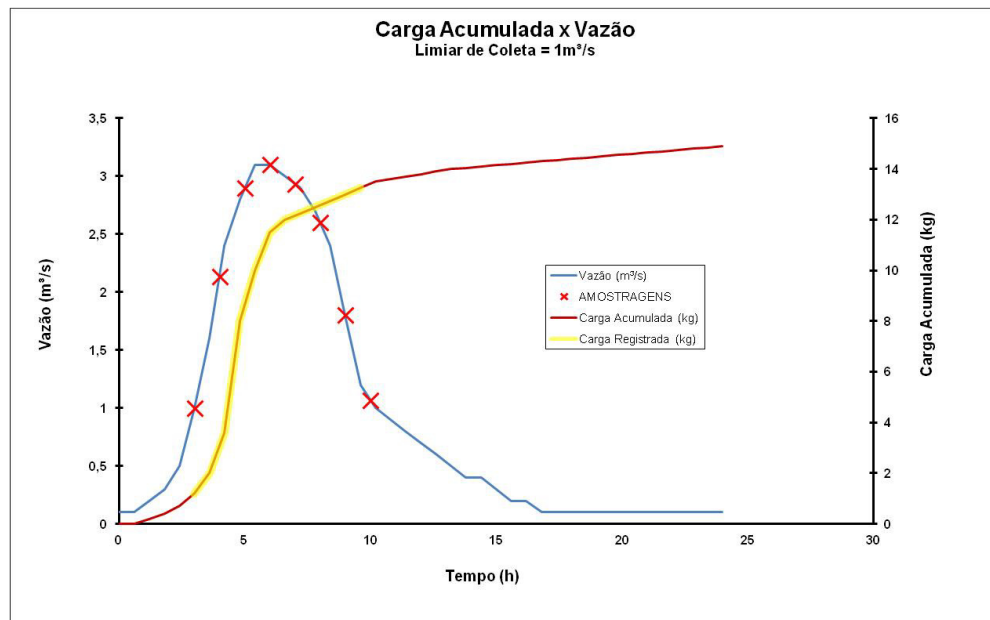


FIGURA 2.4 – Erro de estimativa de carga causado pela adoção de um elevado patamar para início da coleta.
Fonte: adaptado Harmel *et al.*, (2003)

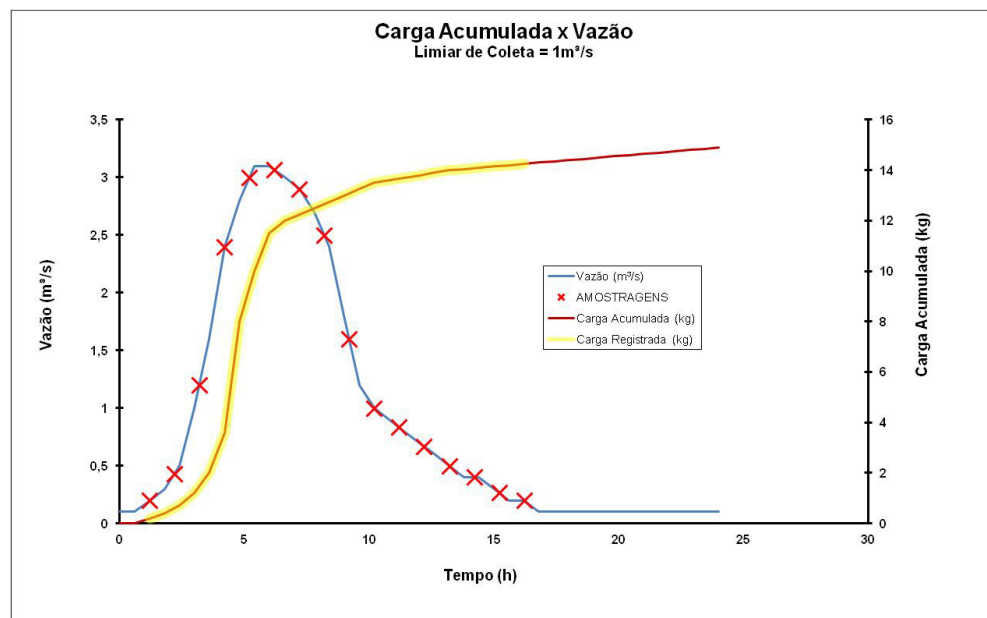


FIGURA 2.5 – Carga registrada com amostragem correta
Fonte: adaptado Harmel *et al.*, (2003)

O processo de amostragem baseado em intervalos de tempo apesar de descrito por Harmel *et al.*, (2003) como mais simples e menos sujeito a falhas, necessita de programação adequada para atender a aleatoriedade das ondas de cheia, pois erros importantes podem ocorrer se for escolhido um intervalo de amostragem inadequado (ROBERTSON, 2003).

Como existe um limite de 24 frascos na maioria dos equipamentos comerciais, o evento mais longo que poderá ser registrado terá a duração máxima de 24 intervalos de amostragem. Se, por exemplo, for adotado um intervalo de amostragem de 10 minutos, a autonomia do amostrador será de 4 horas (240 minutos). Ocorrendo um evento cuja duração exceda esse limite, ou seja, 6 horas, as duas últimas horas do evento deixarão de ser registradas em virtude do esgotamento da capacidade do amostrador. Por outro lado, ao se adotar um intervalo de uma hora, a autonomia do equipamento será de 24 horas. Ocorrendo um evento cuja duração não ultrapasse 4 horas, este evento seria registrado com apenas 4 amostras, o que pode ser insuficiente para o cálculo correto do EMC. Fica assim evidenciado, que a aleatoriedade dos eventos de chuva, quando transferida para a elevação da vazão dos rios causada pelo escoamento superficial, dificulta a adoção de estratégias de amostragem baseadas no tempo.

Por melhor que seja a escolha dos intervalos entre coletas e do patamar de nível a partir do qual a sequência de coletas é deflagrada, sempre poderá haver eventos cujo registro será prejudicado, ora porque o intervalo de tempo é curto demais para cobrir com 24 frascos todo o evento, ora porque o evento seja mais rápido do que se esperava, e o intervalo de tempo é longo demais para detectar os detalhes, o que pode ser observado na Figura 2.6.

A adoção de um esquema de amostragem baseado em intervalos de nível, devidamente transformados em vazão pela aplicação da curva chave da seção, poderia resolver parte desses problemas. Entretanto, esta é uma solução que implica em um custo adicional importante, pois é necessário adquirir acessórios para a leitura de nível que sejam compatíveis com o amostrador. Este tipo de abordagem não é descrito na literatura.

Além disso, o processo de medição de nível deve ser contínuo para que seja possível determinar o momento adequado para a realização da coleta, o que pode representar limitações em termos da energia do sistema. Entretanto, quando se compara o resultado das estratégias de amostragem por tempo e vazão, existe uma vantagem, para o processo de coleta comandado pela medição da vazão (HARMEL *et al.*, 2002), pois o número de amostras coletadas durante os momentos de vazão mais alta é maior, proporcionando melhor discretização do comportamento das concentrações de poluentes ao longo do hidrograma.

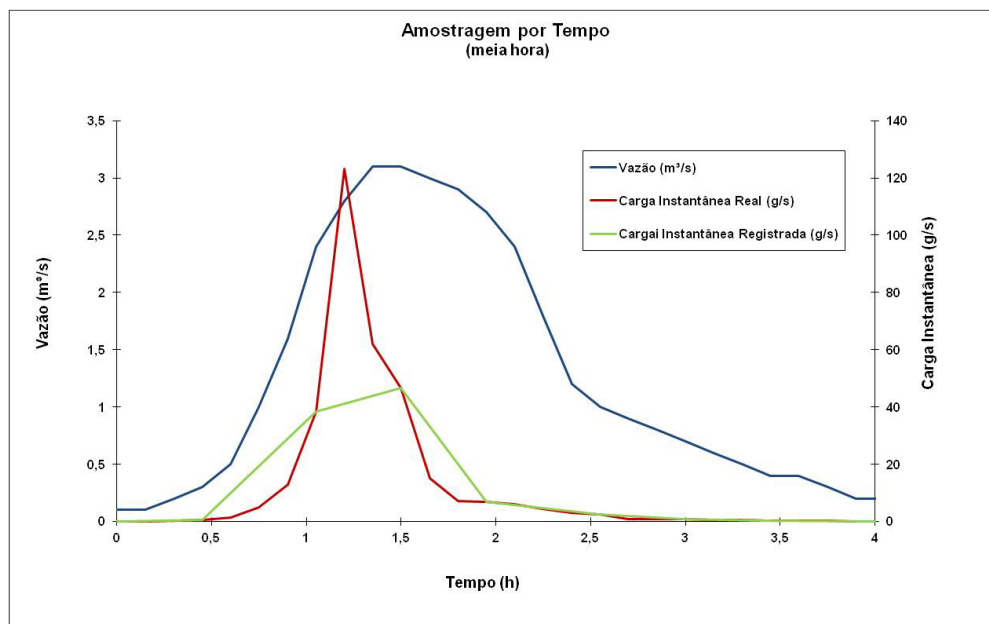


Figura 2.6 – Sub-amostragem causada pela escolha de intervalos de 30 minutos em um evento de 4 horas de duração.

Fonte: adaptado de Harmel *et al.*, (2003)

Os amostradores podem ainda ser programados para coletar amostras compostas. Esta estratégia reduz o custo das análises e aumenta a autonomia e a capacidade de coleta dos amostradores automáticos, normalmente limitada a 24 garrafas individuais. Por exemplo, a adoção de amostragem em cinco volumes de 200 mL para cada garrafa de coleta faz com que possam ser coletadas amostras durante 120 intervalos de tempo, sem mudança no custo total de análise do conteúdo das 24 garrafas. Entretanto, ocorre um prejuízo na discretização do transporte de poluentes, uma vez que o conteúdo de cada garrafa passa a representar a concentração média de cinco diferentes instantes de amostragem.

A questão do custo é um fator determinante nos estudos mais abrangentes sobre poluição difusa urbana. Amostradores automáticos são caros. Em se adicionando acessórios necessários ao comando por variação de vazão o processo se torna mais oneroso. Além disso, a instalação do equipamento demanda a construção de um abrigo adequado, que possa fornecer segurança contra intempéries e vandalismo, o que encarece ainda mais a sua utilização.

Na prática, poucos pesquisadores arriscam instalar equipamentos desse tipo em áreas urbanas, mesmo em locais em que exista alguma segurança, pois o custo do equipamento é elevado, sendo difícil evitar que o aparelho e o seu abrigo sejam alvo de vândalos.

Para tentar suprir a necessidade da pesquisa em poluição difusa, pesquisadores brasileiros têm tentado desenvolver equipamentos menos dispendiosos e capazes de realizar tarefas necessárias ao estudo, denominados ANA – Amostrador de Nível

Ascendente, e AND – Amostrador de Nível Descendente (PARANHOS, 2003; PAIVA, 2004; BRITES, 2005; BRITES *et al.*, 2005)

O ANA é baseado em equipamentos semelhantes denominados *Rising Stage Water Quality Samplers*, cuja descrição detalhada é apresentada por Newham *et al.*, (2004). Equipamentos desta categoria são compostos por garrafas dotadas de um sistema de sifão, que são preenchidas por gravidade sempre que for alcançado o nível em que o sifão atua. Esses equipamentos são compostos por várias garrafas; cada uma delas dotada de um sifão com altura de acionamento diferente, o que faz com que o amostrador seja capaz de coletar várias amostras em níveis diferentes, acompanhando a subida do hidrograma (Figura 2.7).

Analogamente, o AND consiste de um conjunto de garrafas, dotadas de sifão especial que, por um processo mecânico, aberto somente quando o nível das águas está diminuindo. Dessa forma, o amostrador é capaz de coletar várias amostras em níveis diferentes, acompanhando a descida do hidrograma. Uma descrição detalhada de um AND é apresentada por Paiva *et al.*, (2004).

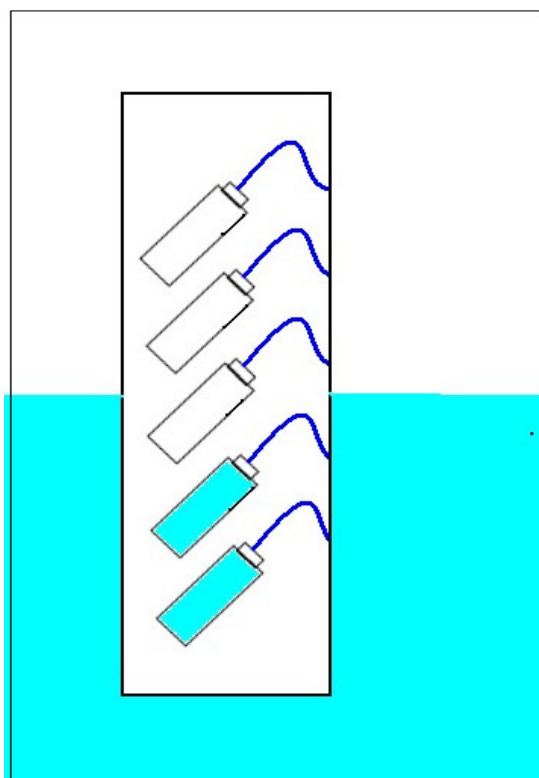


Figura 2.7 – Esquema de Amostrador de Nível Ascendente (ANA)

Tanto o ANA quanto o AND, representam uma possibilidade econômica para a viabilização do monitoramento da poluição difusa no Brasil. Um exemplo de utilização bem sucedido foi conduzido por Brites (2005) e por Brites *et al.*, (2005). Nesses estudos, conduzidos em uma bacia urbana com área menor do que 5 km², os autores observaram o aumento de massa transportada com o aumento da intensidade média do evento e com o total precipitado, contudo não foi identificada uma esperada correlação entre o aumento da carga de poluentes carregados pelo escoamento superficial para o interior dos rios com o número de dias do período seco que precedeu os eventos.

À luz dos estudos realizados por Harmel *et al.*, (2003), pode-se deduzir que os ANAs e os ANDs, que já foram testados em pesquisas no Brasil, podem apresentar limitações significativas de uso, impostas por sua concepção e modo construtivo. Limitações de espaço físico impedem a instalação de muitas garrafas de coleta tanto em ANAs como em ANDs. A concepção do equipamento dificulta a regulagem das alturas de acionamento, sendo comum a adoção de intervalos fixos e constantes entre um nível de acionamento e outro, o que limita a abrangência dos estudos.

Tais características dificultam o estudo mesmo em bacias agrícolas, nas quais existe maior homogeneidade de condições de transporte. Os resultados obtidos por Zucco (2011) podem ser citados como exemplo. A autora não conseguiu observar diferenças importantes entre concentrações de poluentes em amostras coletadas por ANA e AND, durante eventos de cheias em uma bacia hidrográfica agrícola. A lavagem de poluentes, cuja existência é teoricamente possível, não foi detectada pela utilização desse tipo de equipamento.

Para facilitar a compreensão das dificuldades enfrentadas por pesquisadores, no Quadro 1 é apresentado um resumo das tecnologias de amostragem disponíveis, sendo ressaltadas suas vantagens e desvantagens, para amostradores tipo ANA, o conjunto ANA-AND, o amostrador ISCO de forma tradicional e, por fim, ao amostrador ISCO com adaptação para funcionamento po variações de nível.

É importante assinalar que os custos de implantação e operação crescem da esquerda para a direita, sendo o que o menor custo de implantação está no ANA e o maior, no amostrador ISCO dotado de sensor nível ou vazão. No caso dos amostradores ISCO, há limitações quanto ao número de frascos de coleta e da autonomia da bateria, indicando a necessidade de que as estratégias de amostragem devam ser previamente estudadas para que as amostras coletadas sejam adequadas à caracterização dos eventos em estudo.

Quadro 1 – Características e Limitações dos Amostradores Automáticos

Característica	ANA	ANA + AND	ISCO	ISCO + NÍVEL
registro do instante da coleta	Não	Não	Sim	Sim
precisa de disparo externo para iniciar a coleta	Não	Não	Sim	Não
possibilidade de refrigeração	Não	Não	Sim	Sim
autonomia da bateria	não usa	não usa	7 dias	7 dias
regulagem dos níveis de coleta	Difícil	Difícil	impossível	por meio de programação
ajuste do intervalo de tempo entre coletas	impossível	impossível	por meio de programação	
deteção do início do evento	fixa pré-programada por nível	fixa pré-programada por nível	fixa pré-programada por nível ou chuva	fixa pré-programada por nível ou chuva
possibilidade de descarte da amostra	Não	Não	Não	Não
amostra composta	Não	Não	Sim	sim

2.5 ESTRATÉGIAS DE AMOSTRAGEM

A amostragem automática representa um desafio e uma dificuldade que pesquisadores do mundo todo tentam resolver de diferentes formas. Kronvang *et al.*, (1997) adotaram uma estratégia para a avaliação de cargas anuais e eventuais de sedimentos e fósforo exportadas a partir de uma bacia hidrográfica de 11 km² que se baseia em um estudo tri-anual fundamentado em um duplo sistema automático de coleta de amostras. Estes autores descreveram a utilização de um equipamento amostrador automático foi programado para coletar amostras horárias de 125 mL, compondo um litro a cada 8 horas, produzindo ao final de uma semana 21 frascos de 1000 mL para análise. Um segundo equipamento foi programado para, sendo disparado pela elevação de nível, coletar amostras individuais de 1000 mL a cada hora, produzindo 24 amostras de 1000 mL em 24 horas, após disparo pela elevação do nível.

O esquema é interessante, pois a existência do primeiro amostrador operando continuamente a cada hora pode, em parte, compensar a deficiência na amostragem inicial propiciada pelo segundo amostrador. É possível que esta solução tenha sido adotada para contornar os problemas relacionados ao patamar inicial de amostragem, descritos por Harmel *et al.*, (2003).

Em estudo que buscou avaliar a eficiência da remoção de poluentes difusos em uma pequena área alagada construída (450 m²) em uma bacia de drenagem de 52 ha em Victoria – Austrália, Raisin *et al.*, (1997) utilizaram um esquema de monitoramento baseado em um amostrador automático cujo disparo de amostragem foi realizado por um *datalogger*. Este equipamento armazenava em sua memória uma lista de níveis de referência que, ao serem ultrapassados pela leitura de nível, tanto na subida como na recessão, disparavam o processo de coleta de uma amostra simples de 500 mL.

O esquema de amostragem descrito é bastante sofisticado, considerando as limitações dos aparelhos disponíveis à época. Entretanto, não são apresentadas referências sobre os modelos tanto do amostrador quanto do *datalogger* utilizados. Neste caso, o *datalogger* passa efetivamente a comandar a amostragem. Ao contrário do exemplo anterior, a amostragem não é deflagrada por tempo e sim pelo nível que é lido rotineiramente pelo *datalogger*, o qual passa a funcionar como um sensor de nível acoplado ao amostrador. Uma desvantagem é a utilização de patamares fixos de nível, que impõem ao operador a tarefa de prever o comportamento da seção de controle durante eventos futuros, o que nem sempre pode ser realizado com sucesso.

Uma estratégia mais simples para avaliar a concentração de poluentes presentes em águas combinadas (CSOs - *combined sewer overflows*) foi adotada por Geonha *et al.*, (2007), durante a ocorrência de eventos de precipitação em uma bacia urbana de 136 ha. Estes autores utilizaram amostragem automática realizada em intervalos regulares de tempo combinada com a amostragem manual durante os momentos de pico de vazão. Esta combinação de amostragens é viável para pequenas bacias hidrográficas, nas quais existam fácil acesso dos pesquisadores à área de estudo.

Em estudo que teve como objetivo caracterizar a estimativa de carga de poluentes por via difusa em uma bacia de 15 ha, Sung *et al.*, (2010), utilizaram um leitor automático de nível para disparar a operação de um amostrador automático ISCO®, modelo 6712, a partir de um patamar inicial de nível. Foram coletadas amostras a cada quarto de hora ou meia hora, até o ponto máximo do hidrograma, e a cada uma ou duas horas na recessão.

Este esquema busca reduzir o custo de análises em amostras coletadas após o pico do hidrograma. Entretanto, os autores não fornecem informações sobre como este momento foi determinado, embora da área de estudo permita supor que o comportamento do hidrograma seja mais facilmente previsível. A previsão da forma do hidrograma de um

evento futuro persiste sendo, pois, a grande limitação de esquemas automáticos de coleta de amostras durante eventos de cheia.

Em comparação, um procedimento bem mais simples foi adotado por Zhao *et al.*, (2008), em um estudo que buscou estabelecer correlações entre as características de bacias florestadas e os eventos de precipitação com aporte de poluentes carreados em decorrência de chuvas intensas no Japão. A coleta de amostras foi realizada por meio de amostradores acionados automaticamente quando o nível aumenta. Amostras individuais foram coletadas a cada meia hora na recessão do hidrograma ou ao longo de todo o evento quando as bacias possuíam mais de 30 ha. Neste artigo é analisada a utilização de vários amostradores automáticos, regulados para tomar amostras temporizadas, uma vez que o nível de disparo seja alcançado, sem maiores explicações sobre as decisões tomadas.

Também pode ser citado o procedimento baseado na precipitação, como aquele utilizado por Parker *et al.*, (2010), em estudo que avaliou a contaminação fecal provocada por escoamento superficial em regiões costeiras, na Carolina do Norte, Estados Unidos. Os autores utilizaram amostradores automáticos em modo temporizado, cujo disparo foi realizado desde o momento da detecção de uma precipitação maior do que 5 mm, no intervalo de uma hora, até que fosse observado o transcorrer de uma hora sem precipitação.

Com ênfase na caracterização de fontes de poluição difusa em bacias semi-urbanas na Austrália, Bakri *et al.*, (2008), utilizaram um amostrador ISCO® comandado por um *datalogger* para realizar coletas em níveis fixos e pré-determinados.

Stumpf *et al.*, (2010) também utilizaram um amostrador ISCO® acoplado a um medidor de velocidade acústico, programado para efetuar coletas em velocidades pré-determinadas. Neste caso, a adoção de um medidor de velocidade substitui, com maior precisão, a medida de nível da seção

É importante observar que a grande dificuldade que persiste em qualquer dos esquemas abordados nesta seção consiste em ajustar parâmetros de amostragem – os patamares mínimos de amostragem, e intervalos de tempo, nível ou vazão – que sejam adequados ao formato dos hidrogramas de eventos futuros. Como hidrogramas não são totalmente previsíveis, a amostragem pode se desviar consideravelmente do fenômeno que se deseja registrar.

Um caso incomum de reconhecimento das dificuldades encontradas no processo de amostragem é apresentado por Suarez e Puertas (2005). Os autores descrevem as dificuldades relacionadas à amostragem de eventos de cheia utilizando um amostrador automático associado a uma chave de nível. Uma das principais questões discutidas na pesquisa é com relação a escolha do patamar de nível a partir do qual se inicia a rotina de amostragem, bem como as decorrentes da tentativa de ajustar intervalos de tempo

diferentes para as esperadas *elevação* e *recessão* do nível durante os eventos de interesse. Os autores concluíram que, “não é fácil amostrar um evento adequadamente desde o início”.

Textos científicos com detalhes suficientes que permitam uma avaliação das práticas de amostragem são relativamente incomuns. Entretanto, tomando por base o que foi exposto e, considerado ainda o custo dos equipamentos e da realização de análises laboratoriais, é possível deduzir que os custos associados à amostragem de eventos de cheias não podem ser desconsiderados e que maiores dificuldades são enfrentadas pelos pesquisadores em estudos cuja limitação financeira dificulta a aquisição de acessórios para os equipamentos amostradores.

Os esforços que serão descritos neste documento foram feitos para produzir um sistema de amostragem que possa atender a variabilidade dos hidrogramas em forma, intensidade e duração, com uma quantidade adequada de amostras. Foi necessário abandonar a ideia de predeterminação de parâmetros fixos de amostragem, e adotar um esquema capaz de se ajustar aos hidrogramas dos eventos em tempo real, cujo desenvolvimento é o foco desta tese.

2.6 ANÁLISE CRÍTICA

Estudos visando a quantificação do aporte de poluentes por via difusa não são triviais. Eles demandam bom conhecimento do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica e ainda um melhor programa de coletas de amostras durante a ocorrência de chuvas que provoquem escoamento superficial.

A quantificação dos poluentes é realizada pela coleta de amostras realizada concomitantemente à medida de vazão do rio, de forma a permitir a integração de medidas de quantidade e qualidade das águas.

A coleta de amostras é geralmente efetuada por equipamentos automáticos que precisam ser programados para atuar apenas nos momentos em que eventos de cheia forem registrados na seção de interesse.

Existem limitações importantes nos equipamentos automáticos disponíveis que poderiam ser utilizados em estudos da poluição difusa em trechos de rios urbanizados. São equipamentos dispendiosos para a aquisição, e que demandam obras civis quando de sua instalação nas seções de interesse tanto para viabilizar sua operação quanto para a proteção dos próprios equipamentos.

Equipamentos alternativos, como os ANAs e ANDs são mais econômicos, mas são bastante limitados e podem não produzir os resultados necessários às pesquisas na área em virtude da resolução limitada.

A detecção do início do evento a ser amostrado é fator determinante do sucesso da amostragem, pois existe a possibilidade de haver um maior transporte de poluentes nas primeiras águas escoadas. Esta detecção deve ser realizada por nível. Esquemas baseados na precipitação são possíveis, apesar de menos confiáveis pois existe a possibilidade de haver descompasso entre a precipitação e a alteração de nível na seção.

Uma vez detectado o início de um evento de interesse, o comando das amostras subsequentes pode ser realizado por meio de temporização ou por meio de leituras de nível ou de vazão.

Esquemas temporizados de amostragem são mais simples e confiáveis, mas não conseguem acompanhar adequadamente a variabilidade da duração dos eventos de cheia.

Por outro lado, os esquemas baseados em variação no nível ou na vazão são mais complexos, demandam investimento alto no caso dos amostradores ISCO.

É importante notar que tanto nos equipamentos automáticos do tipo ISCO quanto nos ANAs e ANDs persiste a falta de capacidade para efetuar o desejável acompanhamento da variação do nível do rio na situação pré-evento. A amostragem é iniciada quando o nível atinge um patamar fixo tanto num caso quanto no outro.

As limitações apresentadas permitem afirmar que o estudo da poluição difusa em trechos de rios urbanizados brasileiros não se desenvolveu devido à falta de equipamentos adequados para a coleta automática de amostras.

Um histórico do desenvolvimento dos amostradores automáticos é apresentado no Anexo I. Nele são apresentados detalhes dos desafios enfrentados e os motivos que conduziram às soluções encontradas.

No próximo capítulo é apresentada uma técnica de amostragem, baseada em um ISCO e um *datalogger* de alta performance, que foi proposta e testada em campo na bacia do rio Barigui como parte importante do desenvolvimento de um *amostrador automático inteligente*.

CAPÍTULO 3

A Variável Hidrológica Dinâmica

“I know who I was when I got up this morning, but I think I must have been changed several times since then” – Lewis Carroll (Alice in Wonderland)

3.1 CONCEITO

A amostragem adequada, conduzida para a grande maioria dos eventos, é condição essencial para que a caracterização dos processos de transporte de poluentes por via difusa seja realizada com sucesso.

Neste trabalho, o termo amostragem adequada pode ser definido como aquela que consegue, para a grande maioria dos eventos registrados ao longo do estudo, obter coleções de amostras bem distribuídas, iniciadas imediatamente após o começo de cada evento.

Quando se estuda trechos de rios urbanizados, como o que é descrito ainda neste capítulo, a variação do nível do escoamento de base, existente imediatamente antes da ocorrência de um evento, impõe limitações à definição do limiar inicial de amostragem. Da mesma forma, a variação tanto da amplitude quanto da forma dos hidrogramas impõe ainda mais dificuldades no ajuste dos patamares de amostragem.

Adicionalmente a estas questões, e considerando as limitações dos amostradores automáticos mais utilizados, tanto em termos de frascos individuais para coleta quanto em termos da autonomia das baterias, é essencial, não somente efetuar coletas nos momentos mais adequados, como evitar a coleta de amostras em momentos em que estas serão desperdiçadas.

A escolha de patamares fixos, tanto para o limiar de escoamento a partir do qual serão realizadas coletas, quanto para os intervalos de tempo (esquema temporizado) ou de nível (esquema por nível ou escoamento) entre coletas subsequentes representa uma limitação séria, resultando em uma coleção de amostras pouco representativa dos eventos que se quer avaliar. Na Tabela 3.1 são resumidas as situações que devem ser evitadas.

Quadro 3.1: Situações críticas a serem evitadas

TODOS OS ESQUEMAS		SITUAÇÃO	PROBLEMA	CONSEQUÊNCIA
		Limiar de amostragem baixo	Amostras coletadas sem a ocorrência de eventos	Esgotamento da capacidade do amostrador
		Limiar de amostragem alto	Amostras não são coletadas no início dos eventos	Perda de registro da lavagem inicial
ESQUEMAS POR INTERVALOS DE:	TEMPO	Estabelecimento de intervalos demasiado longos	Perda de resolução em eventos de curta duração	Amostras pouco significativas
		Estabelecimento de intervalos demasiado curtos	Esgotamento rápido da capacidade do amostrador	Perda de informação em eventos longos
	NÍVEL OU VAZÃO	Estabelecimento de intervalos pequenos	Esgotamento rápido da capacidade do amostrador em eventos intensos	Perda de informação no final de eventos de grande intensidade
		Estabelecimento de intervalos de nível ou escoamento grandes	Perda da resolução em eventos menores	Amostras pouco significativas

Para que eventos cujos hidrogramas variam em intensidade, duração e patamar inicial sejam amostrados adequadamente, impõe-se a adoção de um esquema adaptativo, que seja capaz de se ajustar automaticamente ao evento na medida em que este se desenrola.

Tal esquema somente pode ser implementado por meio de um processo de interpretação das leituras de nível ou da vazão registradas na seção, o qual deve poder observar a intensidade das variações do parâmetro escolhido.

A tomada de decisão sobre quando efetuar a coleta de amostras fica, então, vinculada à ocorrência de uma variação importante em um ou mais parâmetros sob constante observação.

Por isso, para efeitos deste estudo, define-se como variável hidrológica dinâmica a variação das leituras de qualquer parâmetro hidrológico de interesse em um dado intervalo de tempo. O termo é introduzido para que se possa destacar a inexistência de patamares fixos para qualquer parâmetro que seja utilizado para disparar o processo de amostragem.

Neste trabalho, o nível foi adotado como variável hidrológica dinâmica. Esta escolha se contrapõe ao uso de intervalos fixos de tempo entre amostragens, patamares fixos de nível ou vazão, descritos no capítulo 2 (COLLINS, 2008; WANG *et al.*, 2011). A diferença para a nova abordagem pode ser resumida na Tabela 3.2, a seguir.

Quadro 3.2 - Aplicação do Nível como Variável Hidrológica Dinâmica

	SITUAÇÃO	ATITUDE	CONSEQUÊNCIA
NO INICIO DO EVENTO	VARIAÇÃO LENTA DO NÍVEL	NENHUMA	NÍVEL SE ELEVA OU RECEDE SEM AMOSTRAR
	VARIAÇÃO RÁPIDA DO NÍVEL	INICIA AMOSTRAGEM	REGISTRO DO INICIO DO EVENTO
DURANTE OS EVENTOS	VARIAÇÃO LENTA DO NÍVEL	MANTÉM INTERVALOS PRE-FIXADOS ENTRE PATAMARES DE AMOSTRAGEM	ACOMPANHA EVENTOS MENOS INTENSOS
	VARIAÇÃO RÁPIDA DO NÍVEL	AMPLIA OS INTERVALOS ENTRE PATAMARES DE AMOSTRAGEM	ACOMPANHA EVENTOS INTENSOS

Como pode ser observado, ao se adotar a variação do nível (variável hidrológica dinâmica) são eliminados os problemas relacionados à adoção de patamares fixos de amostragem.

- Eventos menos intensos são acompanhados porque se encaixam nos intervalos de amostragem,
- Eventos intensos são amostrados com intervalos maiores para evitar que os frascos de coleta se esgotem antes do término do evento. Isso ocorre se for detectada uma variação do nível rápida o suficiente para caracterizar um provável evento intenso.
- Elevações lentas do nível do escoamento de base não provocam o início da amostragem, impedindo a coleta de amostras sem que ocorra um evento.
- Da mesma forma, a recessão do escoamento de base não provocará a formação de um degrau entre o nível do escoamento e o um limiar fixo para o início da amostragem, porque este limiar fixo não existe. Mesmo com uma recessão importante, o início de um evento continuará a ser detectado quando uma elevação rápida de nível for observada.

A seguir será apresentado um estudo para a aplicação do conceito ora apresentado em uma bacia real.

3.2 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA UMA ESTAÇÃO REAL – A BACIA DO RIO BARIGUI

A bacia do rio Barigüi (BRB) localiza-se na Região Metropolitana de Curitiba e drena até a sua foz 260 km² em uma extensão de 66 km, cortando a porção oeste do município de Curitiba no sentido Norte-Sul. As suas nascentes situam-se no município de Almirante Tamandaré e sua foz no rio Iguaçu na divisa entre os municípios de Araucária e Curitiba, como pode ser observado na Figura 9.

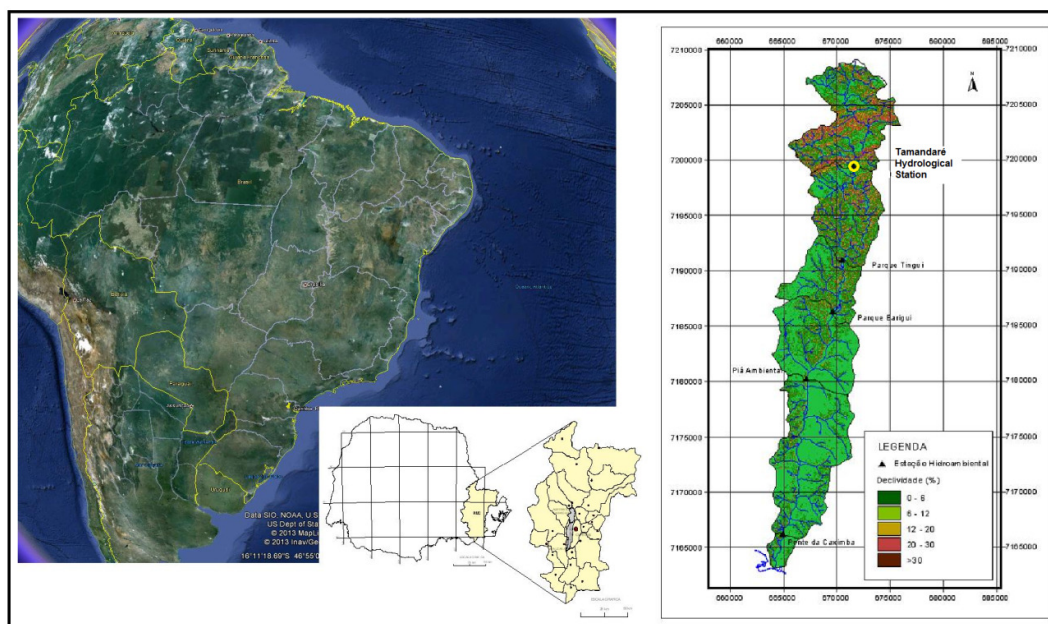


Figura 3.1 – Localização da Bacia do Rio Barigui

Alguns fatos tornam essa bacia o objeto ideal para estudos e pesquisas: (i) sua relativa pequena extensão e a proximidade da capital facilitam o acesso, permitindo visitas freqüentes por parte dos pesquisadores; (ii) suas nascentes são situadas em terreno calcáreo, com presença de atividades tanto mineradoras como agrícolas, com forte presença de horti-fruticultura; (iii) o rio Barigui corta regiões com diferentes tipos de ocupação de solo, passando tanto por áreas nobres de Curitiba como também em setores industriais, regiões de baixa renda e áreas de invasão; (iv) foram implementadas algumas obras para contenção de cheias ao longo da calha principal do rio Barigüi; (v) existe um cemitério de proporções médias, instalado às margens do rio; (vi) o nível de degradação de suas águas aumenta, progressivamente, ao longo de sua passagem por Curitiba; (vii) a principal causa da poluição observada é o lançamento de esgotos domésticos. Outras fontes, como as que são providas de atividades industriais e poluição difusa também são

relevantes (FERNANDES *et al.*, 2004); (viii) a presença de um lago artificial localizado aproximadamente na metade da trajetória do rio impõe uma dinâmica interessante ao regime de transporte de sedimentos, possibilitando intenso assoreamento. Este lago situa-se no mais conhecido e valorizado parque da cidade (Parque Barigui) (CHELLA *et al.*, 2005); (ix) o lago do parque Barigui funciona aproximadamente como um separador em termos de qualidade das águas da BRB, a jusante do qual o processo de degradação se acentua.

Em virtude do exposto, estudos têm sido realizados na BRB já há algum tempo, visando tanto o aprendizado de técnicas de simulação dos fenômenos hidrológicos quanto a ampliação do conhecimento sobre os processos de degradação ambiental infligidos ao rio. Por este motivo, a BRB foi escolha natural quando da aplicação de técnicas de monitoramento da concentração de poluentes aportados por mecanismos difusos.

3.2.1 A definição do ponto de monitoramento

Dentre as estações automáticas de monitoramento existentes na bacia, a estação Tamandaré foi escolhida para os experimentos que são relatados nesta tese. A estação está instalada na área urbana do município de Almirante Tamandaré, nas coordenadas 25° 18,7720 S, 49° 17,7412 O. A área drenada pelo rio Barigui nesta localização é de cerca de 44Km², dos quais cerca de 10% estão situados em zona urbana (Figuras 3.2 e 3.3)

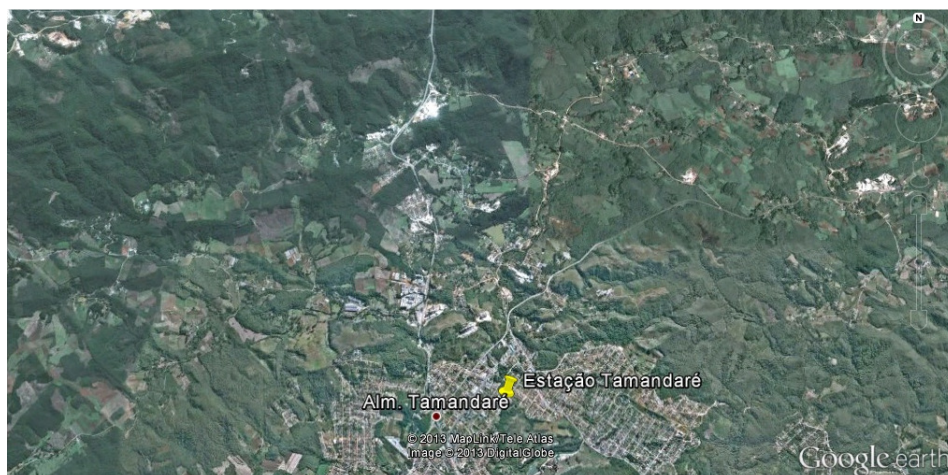


Figura 3.2 – Vista Geral da Estação Almirante Tamandaré



Figura 3.3 – Vista da Estação Almirante Tamandaré

3.2.2 O programa para testar parâmetros de variação

Um programa em *Visual Basic for Applications*, acoplado à planilha EXCEL, foi elaborado para testar a série histórica da estação Tamandaré, na busca pela identificação de parâmetros de variação de nível que pudessem ser utilizados para determinar o início dos eventos de interesse observados na série. O programa, cujo fluxograma é apresentado na Figura 3.4 utiliza como parâmetros de entrada:

V1= variação mínima de nível a ser utilizada na busca do início de eventos de interesse;

Δt = intervalo de tempo máximo para que a ocorrência de V1 caracterize o início dos eventos de interesse;

V2 = intervalo de nível entre coletas subsequentes, a serem coletadas após detectado o início de um evento de interesse.

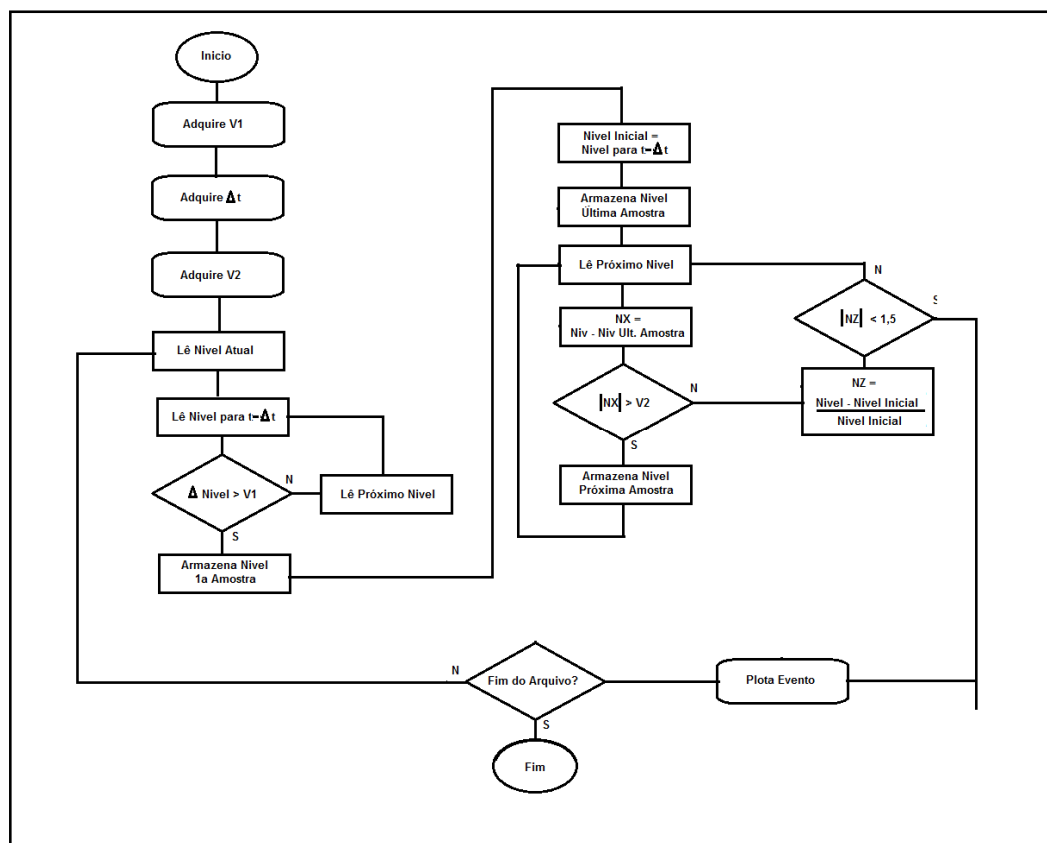


Figura 3.4: Fluxograma do programa de investigação da série histórica

O programa identifica e produz um linograma individual para cada evento detectado na série, nos quais são identificados os instantes em que a amostragem teria sido realizada com os parâmetros $V1$, $V2$ e Δt . Comparando os fluviogramas produzidos pelo programa e a série original é possível observar se os eventos estariam sendo adequadamente amostrados.

3.2.3 Resultados teóricos sobre a série de dados da estação Tamandaré

Para determinar os valores do intervalo de comparação e patamar de detecção mais adequados à estação Tamandaré do rio Barigui, foi realizado um estudo hidrológico em um trecho da série escolhido por não ter apresentado previamente falhas de leitura, como destacado na Figura 3.5, a seguir, para o período de janeiro a julho de 2008 registrados em intervalos de 10 minutos.

Embora existam inúmeros eventos resultantes do escoamento superficial, pode-se observar que o patamar de nível inicial desses eventos varia entre 15 e 28 cm, pois depende do teor de umidade do solo no início do evento e é difícil de avaliar. A existência desta

variação confirma a hipótese de prejuízo em esquemas que adotam um patamar fixo de nível a partir do qual as amostras são coletadas.

Como a maior cota alcançada no período foi de 1,40 m, foram definidos intervalos de 10 cm entre os níveis subsequentes de amostragem. Tal escolha baseia-se no fato de que a maioria dos amostradores automáticos convencionais possui um limite de 24 garrafas de coleta independentes. Se o nível de referência estiver próximo de 20 cm, doze garrafas coletadas em intervalos de 10 cm teoricamente oferecem cobertura para a amostragem até 1,40 m.

Assim, em função das observações, foi adotado um patamar de detecção de 5 cm em meia hora, no qual a amostragem seria iniciada se, em um intervalo de 30 min, o nível da coluna d'água do rio Barigui na seção em estudo elevasse mais do que 5 cm.

O objetivo do teste foi verificar se a configuração escolhida possibilita cumprir dois objetivos importantes: (i) filtrar eventos menores, evitando o desperdício de frascos ocasionado pela coleta de amostras em momentos não desejados para o estudo; (ii) verificar se a configuração de coleta está adequada para oferecer uma boa descrição dos eventos ocorridos no período.

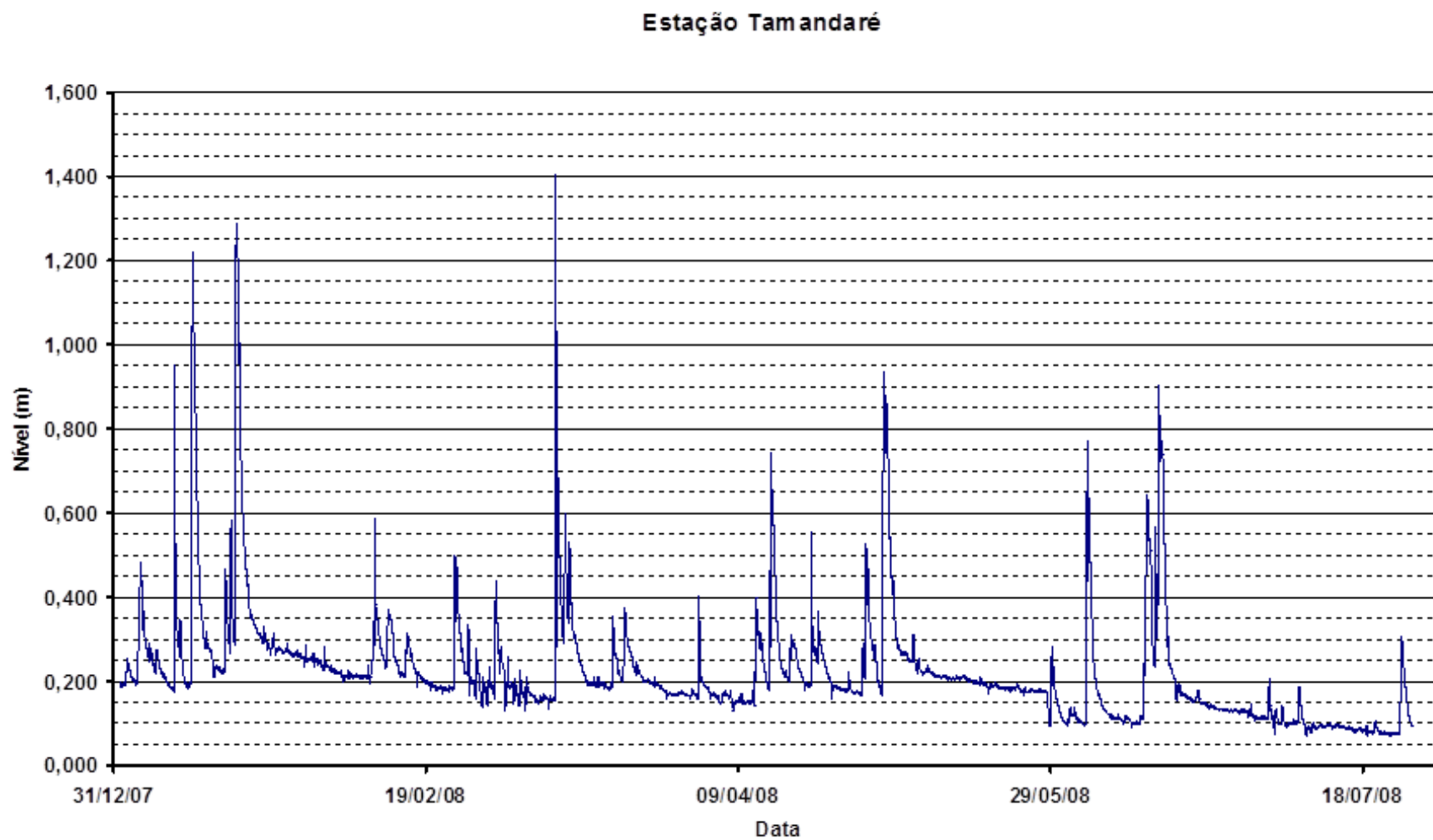


Figura 3.5 – Linigrama da Estação Tamandaré (JANEIRO A JULHO DE 2008)

Primeiramente, foi observado que a configuração não atende ao primeiro objetivo, isto é, filtrar eventos menores para evitar desperdício de frascos ocasionado pela coleta de amostras não desejadas. Vários eventos pequenos, como o apresentado na Figura 3.6, foram amostrados pelo programa, representando desperdício de amostras e a redução da capacidade operacional do amostrador para realizar coletas em eventos futuros.

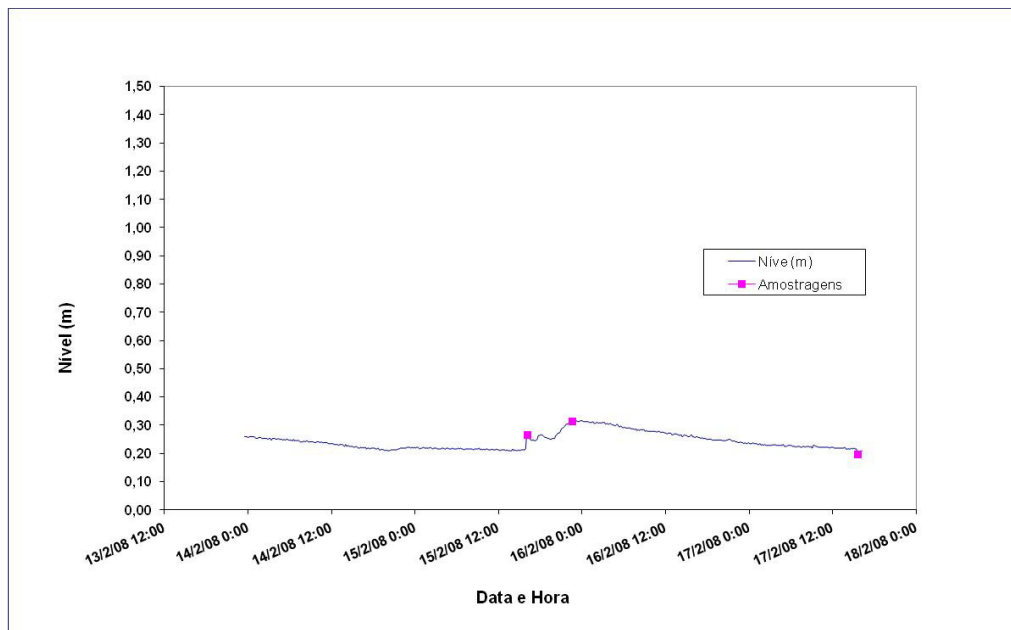


Figura 3.6 – Desperdício de amostragem

O teste também revelou que a configuração não seria viável, ao menos para esta série, uma vez que em várias ocasiões foram observadas grandes variações do nível da seção no intervalo de 10 minutos, que é o intervalo de leitura da estação. Um exemplo do problema pode é apresentado na Figura 3.7.

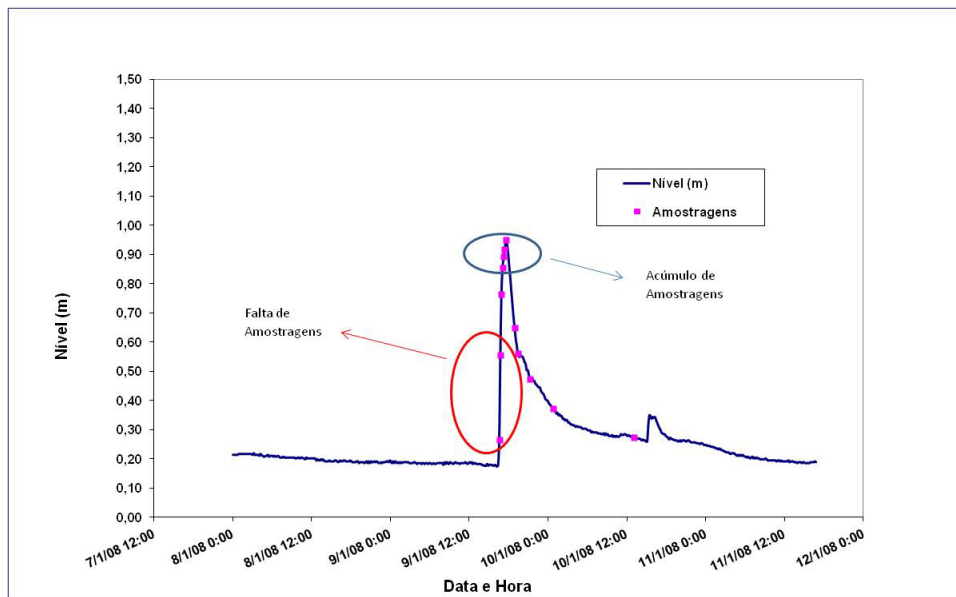


Figura 3.7 – Problemas de Amostragem causados pela baixa resolução temporal

Pode-se observar que o início do evento não é adequadamente amostrado, uma vez que ocorre escassez de coletas no início da subida do nível e uma concentração no pico do linigrama. Este fato decorre da rapidez com que o nível variou no evento. Para a melhor compreensão do processo, a maneira com que algumas amostras foram coletadas será detalhada a seguir:

- o nível anterior ao início do evento foi de 17,9 cm;
- uma leitura de 26,6 cm deflagrou o processo de amostragem. Uma amostragem foi realizada neste instante;
- o nível 17,9 cm foi registrado e foram calculados intervalos de 10 cm a partir desta referência. A segunda coleta ocorreu quando o nível do rio passou do nível de 27,9 cm, a terceira acima de 37,9 cm e assim por diante;
- passados os primeiros 10 minutos o nível lido foi de 55,6 cm. Como o valor lido era superior ao patamar de 27,9 cm, o amostrador realizou a segunda coleta neste instante;
- transcorridos outros 10 minutos, a leitura de nível forneceu 76 cm. O amostrador efetuou a terceira coleta, pois o nível lido foi superior ao patamar de 37,9 cm pré-calculado;
- a quarta coleta ocorreu 10 minutos após, com um nível de 85 cm, posto que esse valor foi superior a 47,9 cm;
- a quinta coleta ocorreu na próxima leitura, com um nível de 89 cm, posto que este valor foi superior a 57,9 cm;

- a sexta coleta ocorreu na próxima leitura, com um nível de 92 cm, posto que este valor foi superior a 67,9 cm;
- a sétima coleta ocorreu na próxima leitura, com um nível de 95 cm, posto que este valor foi superior a 77,9 cm;
- o programa identificou a recessão a partir deste momento, passando a comparar a leitura de nível com a referência de 77,9 cm. Somente quando o nível lido foi inferior a este valor ocorreu uma nova coleta.

Como é possível observar, existe uma grande diferença entre os patamares de coleta previstos e os níveis do rio nos quais as coletas foram realizadas. Esta diferença é causada por falta de resolução temporal, pois foram observadas elevações de nível da ordem de 30 cm entre leituras subsequentes realizadas em intervalos de 10 minutos, o que inviabiliza o registro apropriado do início do evento, dificultado o funcionamento do sistema de amostragem.

Como resultado desta análise, ficou demonstrada a necessidade de uma resolução temporal mais adequada em relação ao processo de leitura de nível da estação Tamandaré. A configuração existente – registrar o nível da seção a cada 10 minutos – não atendeu às necessidades da amostragem. Faltaram amostras durante a elevação do nível, e foram concentradas várias amostragens na região do pico do linigrama.

Neste contexto, a solução do problema consiste no ajuste do intervalo de tempo de leitura, a série original foi dividida em quatro, tendo sido interpolados três valores entre leituras subsequentes. Dessa forma, a série modificada passou a possuir dados de nível registrados a cada 2,5 minutos, para que o programa de amostragem pudesse ser testado com resolução temporal mais efetiva.

Na Figura 3.8, é apresentado o mesmo evento da Figura 3.7, amostrado em teoria com o mesmo patamar de detecção de 5 cm, em um intervalo de 30 minutos, com a mesma variação de 10 cm entre patamares de amostragem, mas realizada com a série modificada para intervalos de registro de 90 segundos. Como pode ser observado na Figura 3.8, descrita com detalhes na Tabela 3.3, a adoção de uma resolução temporal mais fina resulta em melhor distribuição da amostragem para esse evento.

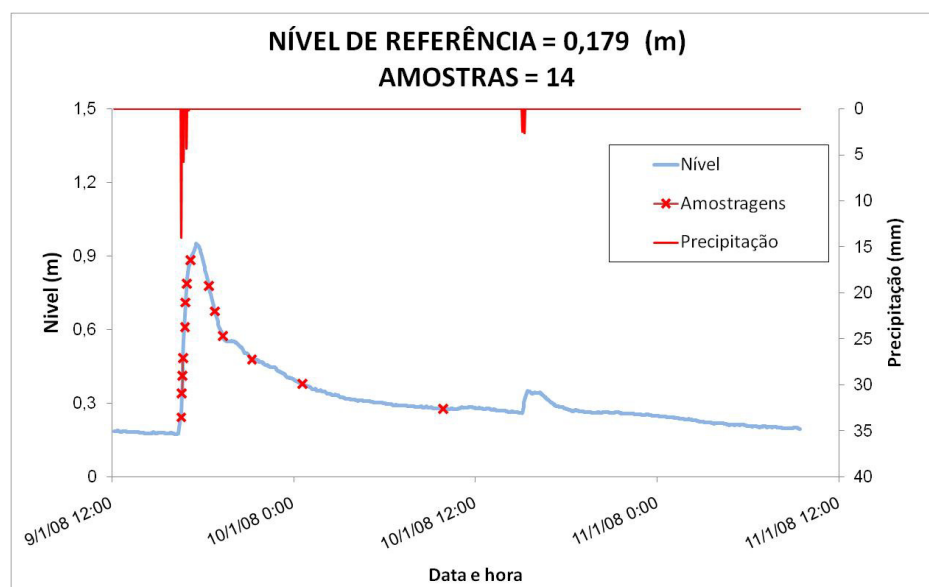


Figura 3.8 – Amostragem com melhor resolução

Quadro 3.3: Resumo do processo de amostragem

Patamar de Detecção	Δt	Nível Amostrado (cm)	Nível Referência (cm)	Amostra
$\Delta \text{Nível} > 5 \text{ cm}$ em $\Delta t \leq 30 \text{ min}$	---	23,3	17,9	inicial
Nível > 27,9	5	34	27,9	2 ^a
Nível > 37,9	2,5	41	37,9	3 ^a
Nível > 47,9	2,5	48,3	47,9	4 ^a
Nível > 57,9	5	60	57,9	5 ^a
Nível > 67,9	5	71	67,9	6 ^a
Nível > 77,9	5	78,6	77,9	7 ^a
Nível > 87,9	7,5	89	87,9	8 ^a
Nível < 77,9	10	77,6	97,9 ou 77,9	9 ^a
Nível < 67,9	20	67,7	67,9	10 ^a
Nível < 57,9	30	57,4	57,9	11 ^a
Nível < 47,9	55	47,7	47,9	12 ^a
Nível < 37,9	200	37,8	37,9	13 ^a
Nível < 27,9	540	27,8	27,9	14 ^a

Ao todo foram realizadas 14 amostragens automáticas ao longo de 15 horas, em intervalos irregulares de tempo, e em intervalos aproximadamente regulares de nível, conferindo uma boa descrição do evento que se desejava registrar.

Dessa forma, ficou demonstrado que o processo de amostragem pode ser realizado de forma adequada se uma resolução temporal mais adequada da leitura de nível for adotada. Essa resolução temporal mais adequada também permite comparar leituras de

nível mais próximas no tempo, situação desejável para tornar mais eficiente a filtragem de eventos menores, o que evita o desperdício de amostras.

Testes realizados nesta série modificada demonstraram que é possível reduzir o tempo de comparação de meia hora para algo em torno de 12 minutos, sem que a amostragem de eventos importantes fosse prejudicada e com o benefício de uma maior eficiência na filtragem de eventos menores. Embora o número de amostras coletadas esteja adequado ao evento, existe a possibilidade de que sejam excedido o limite de 24 amostras individuais dos amostradores automáticos mais comuns. Como são registrados alguns eventos com níveis superiores a 1,80m nesta seção, este limite seria ultrapassado.

Uma solução seria ampliar o intervalo de amostragem para 15 cm, mas isso poderia causar prejuízos para a amostragem de eventos menos intensos. Por este motivo, decidiu-se por alterar o algoritmo de cálculo dos patamares de coleta, de modo a incorporar os valores excedentes registrados quando da subida do linigrama.

Desta forma, a coleta de amostras seria modificada para os valores apresentados conforme a Tabela 3.4 , a seguir.

Quadro 3.4 - Amostragem com a incorporação de excessos aos patamares de coleta

Patamar de Detecção	Δt	Nível Amostrado (cm)	Nível Referência (cm)	Amostra
Δ Nível >5 cm em $\Delta t \leq 30$ min	---	23,3	17,9	inicial
Nível > 27,9	5	34	44	2 ^a
Nível > 44	5	48,3	58,3	3 ^a
Nível > 58,3	5	60	70	4 ^a
Nível > 70	5	71	81	5 ^a
Nível > 81	7,5	81,4	91,4	6 ^a
Nível > 91,4	7,5	92	102 ou 82	7 ^a
Nível < 82	10	76,6	66,6	8 ^a
Nível < 66,6	22	65	55	9 ^a
Nível < 55	25	54,2	44,2	10 ^a
Nível < 44,2	105	44,1	34,1	11 ^a
Nível < 47,9	255	34	24	12 ^a

Como pode se observado, o recálculo dos patamares de amostragem de forma a incorporar as diferenças ocasionadas pela elevação ou recessão rápida do nível da seção proporcionou uma economia de dois frascos de amostragem em um evento não muito intenso, conservando uma boa distribuição de amostras.

Uma vez definidas as diretrizes e os mecanismos da amostragem, foi montado um amostrador capaz de executar na prática o que foi descrito nesta seção. Para tal fim, foram utilizadas funções avançadas do *datalogger*, uma interface de comunicação analógica

especialmente construída, e um amostrador automático comercial do tipo ISCO. O assunto é explorado na próxima seção.

3.3 ANÁLISE CRÍTICA

Este capítulo demonstra as vantagens da utilização de variáveis hidrológicas dinâmicas sobre esquemas estáticos de amostragem, como uma ferramenta para a adequar a coleta de amostras aos hidrogramas dos eventos, em tempo real, na medida em que os eventos se desenrolam.

A amostragem inteligente foi conceituada, e posteriormente testada com sucesso, por meio de um programa específico, em uma série histórica real. Os resultados da adoção da técnica de amostragem inteligente para esta série promoveram à solução de problemas de compatibilidade entre hidrogramas e os instantes em que são realizadas amostragens automáticas. Na próxima seção serão descritos os procedimentos utilizados para testar efetivamente, em campo, um equipamento capaz de comandar a coleta de amostras usando o nível como variável hidrológica dinâmica.

CAPÍTULO 4

Amostragem Automática com o uso do Nível como Variável Hidrológica Dinâmica:

A Amostragem Inteligente

“O mais importante e bonito, do mundo, é isso: que as pessoas não estão sempre iguais, ainda não foram terminadas – mas que elas vão sempre mudando” – Guimarães Rosa em Grande Sertão – Veredas

O conceito para a amostragem automática, definida nesta pesquisa como **Amostragem Inteligente**, tem como princípios: (i) a utilização de uma variável hidrológica dinâmica (Nível) capaz de ser interpretada numericamente, e de forma passível a ser utilizada em programação; (ii) Associar a esta condição, um programa específico que permita tomada de decisões sobre a amostragem de forma a realizá-las nas condições desejadas para avaliar o impacto de processo de poluição difusa.

A técnica é inovadora, pois busca promover a adaptação automática da amostragem a forma dos linigramas dos eventos que se deseja amostrar, sem as limitações impostas pela utilização de parâmetros fixos pré-estabelecidos, como os que são utilizados na literatura, abordados na seção 2.4.

Neste capítulo ênfase é dada nesta condição e que dá o caráter de desenvolvimento tecnológico desta pesquisa. Esta estratégia altera a estratégia de monitoramento utilizada para estudos desta natureza, que em geral utiliza o tempo como variável de controle de automação, ou alterações de níveis em procedimentos manuais (PANAGAPOULOS e MAKROPOULOS, 2012 e YANG e WANG, 2010)

4.1 A UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS CONVENCIONAIS

A amostragem necessária para estudos de poluição difusa requer a medida da vazão da seção em estudo. Por conseguinte, uma visão de integração de sensores e equipamentos faz-se necessário para uma nova visão de monitoramento, ou seja, aquela que integre as condições de automatização em uma seção. Nesta pesquisa, que é focada

no rio Barigui, a escolha lógica foi implementar a amostragem em uma seção na qual uma estação hidrológica automática já estava previamente instalada.

Estações hidrológicas automáticas são normalmente compostas por pequenos computadores dedicados, conhecidos por seu nome em inglês – *dataloggers*, por sensores de nível ou de vazão, pluviômetros, baterias, reguladores de carga, painéis solares e, em alguns casos, telemetria.

Embora existam modelos mais simples, e que atualmente estão se tornando mais comuns em virtude do preço mais baixo, a grande maioria dos *dataloggers* encontrados em estações hidrométricas podem ser classificados como sendo de alto desempenho, e por isso são capazes de executar programas escritos pelo operador/desenvolvedor, tendo também portas de comunicação para efetuar o comando de equipamentos periféricos.

Os *dataloggers* são normalmente utilizados para armazenar os resultados das leituras sensores a ele acoplados, de maneira cíclica e em intervalos regulares de tempo, mas também podem executar, cíclica e automaticamente os programas nele carregados. Esta propriedade será utilizada na amostragem inteligente.

4.1.1 Programando um *datalogger* para comandar a coleta de amostras

Não existe uma linguagem padrão para a programação de *dataloggers*. Assim, cada fabricante utiliza o interpretador que lhe é mais adequado, com as funções que achar adequadas ao funcionamento do aparelho.

No caso da estação Tamandaré, *datalogger* existente é um H-500XL fabricado pela *Waterlog*. Nos aparelhos deste fabricante é incluído um interpretador para a linguagem BASIC, que por ser modificado para atender características específicas do *datalogger*, é denominado pelo fabricante como sendo para a linguagem XL-BASIC.

O XL-BASIC é um interpretador limitado, o qual pode executar até cinco programas independentes (**basic 1** a **basic 5**), e trabalhar com 23 variáveis (**a** até **z**). Apesar destas limitações, o interpretador possui um conjunto bastante completo de funções, que podem ser classificadas como sendo de entrada, de leitura de variáveis, funções matemáticas (básicas, trigonométricas tanto em radianos quanto em graus e logarítmicas), funções de controle do programa, comando de portas, abertura e fechamento de arquivos, etc.

Utilizando algumas destas funções, foi elaborado um programa para implementar a amostragem inteligente na estação. O princípio de funcionamento das rotinas é apresentado no esquema da Figura 4.1. No anexo 1, o programa é apresentado de forma completa e comentada.

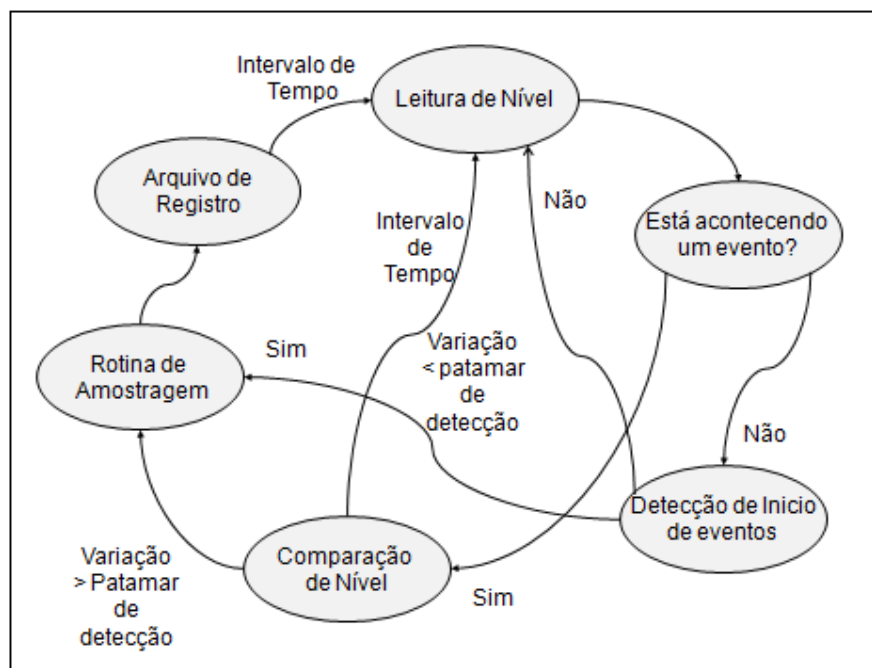


Figura 4.1 – Diagrama esquemático do funcionamento do programa implementado no datalogger H-500-XL

O programa é executado em todas as ocasiões em que o *datalogger*, que nos intervalos entre amostragens permanece em modo de espera (baixo consumo de energia) volta à condição operacional para fazer uma leitura de nível e precipitação.

O programa verifica se um evento está em andamento e, se o resultado for negativo, executa a rotina de detecção de início de evento, a qual compara a leitura atual do nível com uma leitura anterior. Se uma variação acima de um valor prefixado ocorrer, o programa declara o começo de um evento, ou é encerrado em caso contrário.

Se for detectado o início de um evento, o programa aciona a rotina de amostragem, a qual enviará sinais de comando pela porta de comunicação, e registrará o ocorrido num arquivo de texto. No caso da estação Tamandaré, o patamar de detecção inicial foi definido em 5 cm de variação, ocorridos num intervalo máximo de 10 minutos (4 leituras do *datalogger*).

Se um evento já estiver ocorrendo, uma rotina de comparação de nível será acionada para proceder análise do comportamento do nível da seção. A comparação é sempre realizada entre o valor atual do nível e aquele no qual foi realizada a última coleta. Se a diferença for maior que 10 cm (elevação) o programa acionará a rotina de amostragem para realizar uma nova coleta. Se a diferença for superior a -10 cm (recessão), o programa também acionará a rotina de amostragem para efetuar uma nova coleta.

4.1.2 A interface de comunicação

O datalogger envia sinais para comandar o amostrador automático por meio da mudança de estado de uma porta digital de saída. O estado natural desta porta é **desligado**, ou seja, zero Volts. O programa está preparado para, quando acionada a rotina de amostragem, produzir 3 pulsos de 12 Volts, cada um durando cerca de 1s, e com um intervalo de 1s entre eles.

Para evitar o acoplamento elétrico entre o *datalogger* e o amostrador automático utilizado, uma pequena interface de comunicação foi confeccionada para prover o desacoplamento. Trata-se de um pequeno relé que tem a bobina ligada ao *datalogger* e os contatos ligados ao amostrador automático (Figura 4.2).

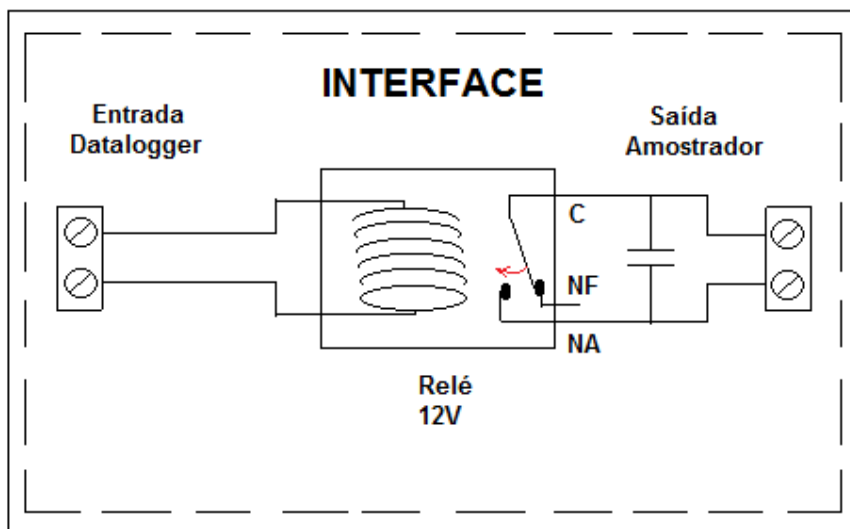


Figura 4.2 – Interface de desacoplamento Logger/Amostrador

A interface conduz os pulsos, produzidos pela porta do datalogger, ao amostrador, preservando o isolamento elétrico entre os equipamentos.

4.1.3 Programando um Amostrador ISCO para receber sinais do datalogger

Os amostradores comerciais tipo ISCO®, como o descrito no Capítulo 2, podem ser acoplados a dispositivos de leitura de vazão que são comercializados pelo fabricante como acessórios.

A partir de um estudo mais detalhado da forma de atuação foi possível identificar que a comunicação entre os acessórios e o amostrador é realizada por pulsos produzidos pelos medidores de vazão, pulsos estes que são lidos pelo amostrador por meio do pino “C” da porta de comunicação existente no amostrador (Figura 4.3).

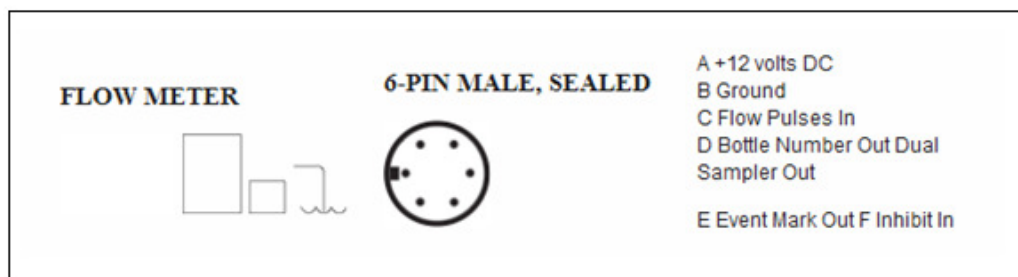


Figura 4.3 – Configuração da Porta de Comunicação

A porta é denominada “Entrada de Pulsos de Vazão” provavelmente porque os pulsos são os sinais produzidos pelos molinetes hidrométricos.

Molinetes hidrométricos produzem um pulso para cada volta completada pela sua hélice, pulsos estes que são lidos e totalizados por um dispositivo de contagem. Os valores totais são transformados em vazão pela equação do molinete para a hélice utilizada.

No caso do ISCO, o dispositivo totalizador foi incorporado ao equipamento para servir de mecanismo de disparo de coletas. Desta forma, é possível programar o aparelho para efetuar coletas em intervalos regulares de volume escoado desde que se conheça a quantidade de pulsos (ou voltas do molinete) que representam este volume. É possível, entretanto, aproveitar esta função para utilizar sinais pulsados produzidos por outros equipamentos que não os molinetes hidrométricos.

Pulsos são sinais elétricos que podem ser produzidos pelo acionamento manual de botoeiras e pelo fechamento de contato de relés, entre muitas outras formas.

Um trem de três pulsos como os que são apresentados na Figura 4.4 é produzido pelo *datalogger* em cada ocasião em que é comandada a coleta de uma amostra e, passando pela interface de desacoplamento, chega aos pinos B e C da entrada Flow Meter do amostrador ISCO.

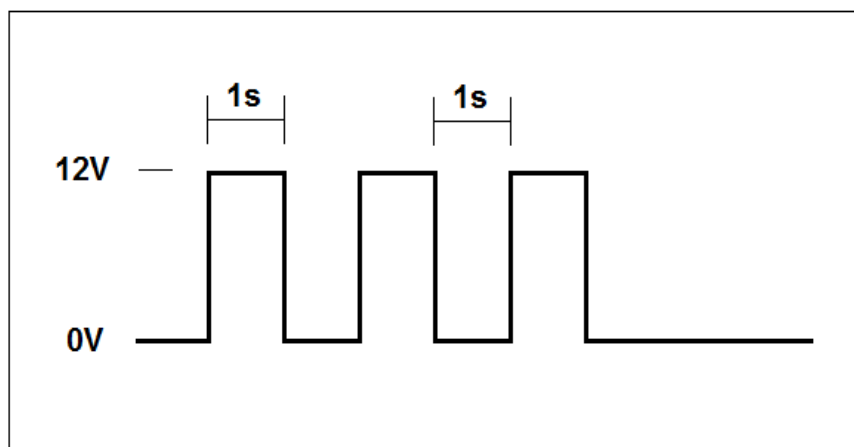


Figura 4.4 - Trem de 3 pulsos produzidos pelo datalogger

O amostrador ISCO foi programado para realizar uma coleta em todas as ocasiões em que a soma dos pulsos detectada no pino C atingir três pulsos. Uma vez realizada a coleta, o totalizador interno é zerado e fica no aguardo de novos pulsos.

É importante explicar que a adoção de 3 pulsos para disparar a realização de uma coleta representa uma segurança para o processo de amostragem. A ideia é evitar que possam ser induzidos nos cabos de comunicação entre o *datalogger* e o amostrador ISCO não venham produzir um falso disparo. Apesar de blindados, o cabeamento pode ser sujeito à interferência eletromagnética de aparelhos de rádio, telefones celulares e pulsos eletromagnéticos induzidos por descargas atmosféricas.

Tanto a interferência eletromagnética quanto a possibilidade de esta interferência vir a ser interpretada como um pulso pelo amostrador ISCO é remota, imensurável em termos práticos, mas presente. A sua ocorrência, entretanto, não provocaria o disparo do processo de amostragem, pois para isso são necessários três pulsos.

4.1.4 Instalando o amostrador inteligente na estação Tamandaré

O amostrador ISCO foi instalado na estação Tamandaré conforme apresentado na Figura 4.5

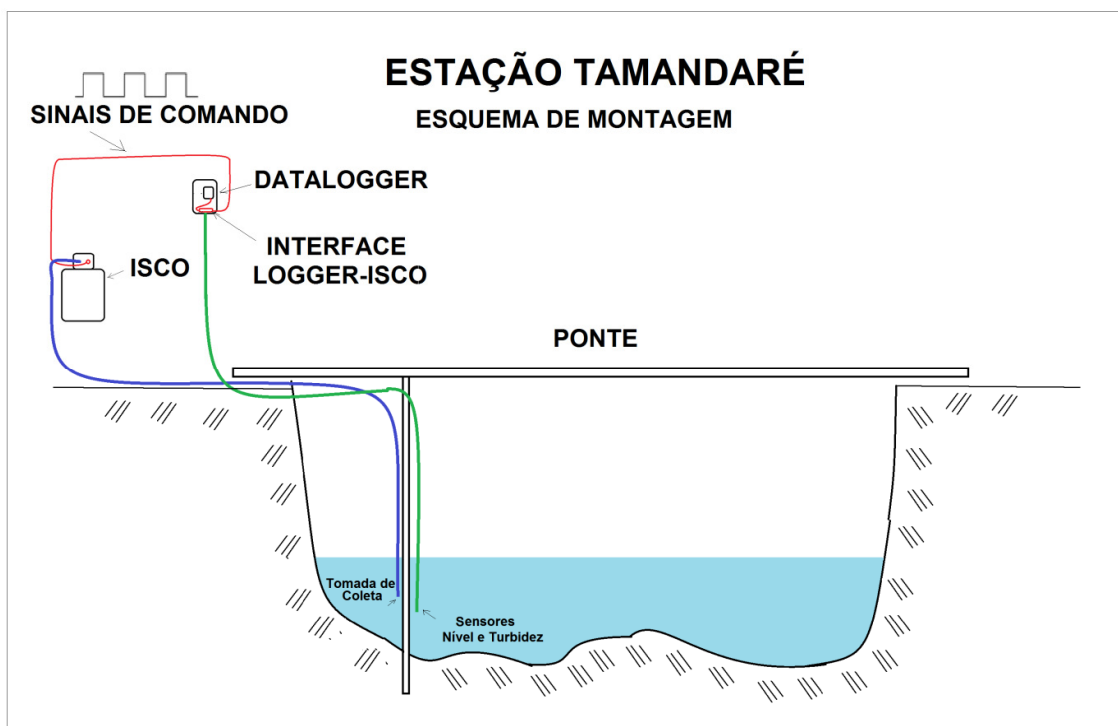


Figura 4.5 - Esquema de Montagem da Estação Tamandaré

O local foi escolhido em função do fácil acesso e condições de instalação e proteção dos equipamentos. Com autorização do proprietário, foi construído um abrigo com cerca de 1 m² para proteger o amostrador, abrigo este que é essencial para proteger o equipamento contra roubo ou vandalismo. O acesso é feito logo antes do portão de entrada da residência, em área protegida contra intempéries, por meio de um porta metálica fechada com cadeado.

Existe uma estaca metálica, fixada na ponte existente no local da estação e cravada no fundo do rio, no único ponto não rochoso, que dá suporte aos sensores da estação, e que foi utilizada para a fixação da tomada de coleta de amostras de água, a qual é conectada ao amostrador ISCO por meio de uma mangueira com cerca de 10 metros de comprimento.

O próprio amostrador foi instalado no abrigo, cujo acesso é externo, não havendo, portanto, necessidade de se adentrar a propriedade para substituir baterias e retirar amostras coletadas.

A interface de comunicação foi instalada dentro da caixa metálica que protege o *datalogger* da estação, e conectada ao amostrador por meio de um cabo protegido por malha metálica aterrada.

4.2 RESULTADOS DA AMOSTRAGEM INTELIGENTE:

O CONJUNTO ISCO-LOGGER OPERANDO NA ESTAÇÃO TAMANDARÉ

O objetivo desta seção está direcionado para as virtudes da amostragem inteligente sob o ponto de vista individual. São apresentados resultados especialmente selecionados para expor aspectos relevantes como a identificação e separação de eventos de interesse, a realização de coletas logo nos seus inícios e a boa distribuição das amostragens para diferentes eventos. Será também demonstrada a ocorrência da lavagem inicial, sendo também apresentados cálculos para a concentração média do evento para alguns poluentes.

4.2.1 Os primeiros linigramas – resultados iniciais da amostragem inteligente

O reconhecimento adequado do início dos eventos de interesse é a primeira e talvez a mais importante tarefa a ser executada por um sistema de amostragem.

Sem um bom registro do início dos eventos de interesse, e a consequente coleta de amostras logo nas primeiras variações dos linigramas, pairará sempre a dúvida sobre a ocorrência ou não da lavagem inicial, reduzindo o grau de confiança dos cálculos da quantidade de poluentes transportada através da seção.

Por isso é importante observar o comportamento geral do processo de amostragem ao longo de algum tempo, para verificar se o método contempla adequadamente, com amostragens, os eventos registrados. Também é possível perceber se os parâmetros de detecção do início dos eventos estão adequados à seção.

Os primeiros resultados obtidos para a estação Tamandaré do rio Barigui são apresentados na Figura 4.6, na qual é mostrado o linigrama juntamente com o hietograma para o período de janeiro e fevereiro de 2012.

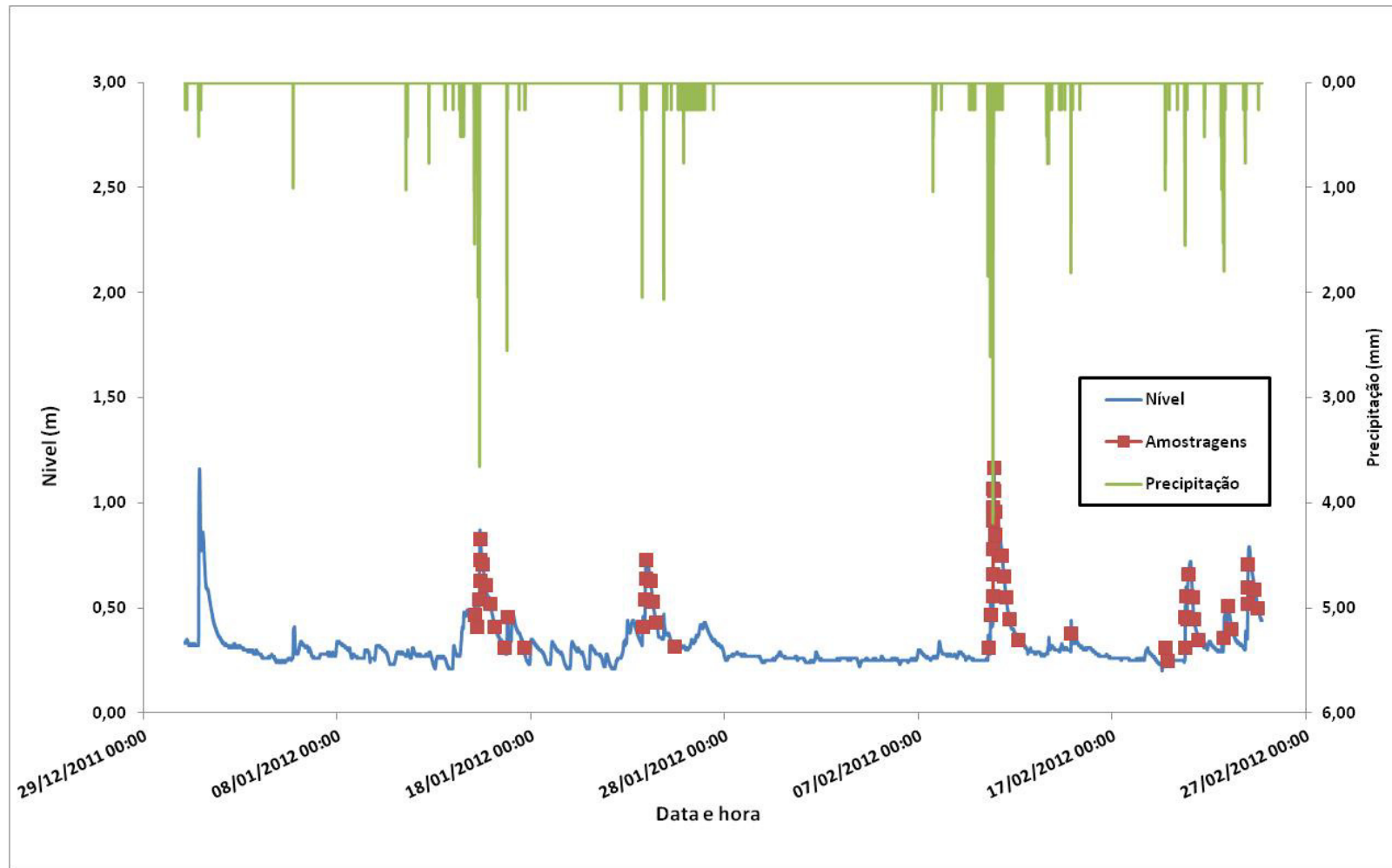


Figura 4.6 – Linigrama e amostragens para Janeiro e Fevereiro de 2012

Nesta figura são identificados os instantes de tempo em que o conjunto efetuou as coletas de amostras. Todos os eventos de relevância foram amostrados, com exceção daquele ocorrido entre os dias 31/12/11 e 01/01/12, quando o equipamento ainda não estava completamente operacional. Observa-se, particularmente, nos eventos 1 (15/01) e 2 (24/01) que o processo de amostragem só se inicia, quando de fato a variável hidrológica dinâmica aponta para um escoamento superficial direto e efetivamente caracterizando o início do escoamento. E, por conseguinte, em todos os eventos de escoamento superficial pode ser observada uma boa distribuição das amostras ao longo da evolução dos eventos. É importante notar que o modelo adotado não permitiu a realização de coletas na grande maioria das variações de nível menos intensas.

Cabe destacar que o evento registrado no dia 15/02/2012, no qual foi registrada uma precipitação de 1,8 mm, de curta duração, logo com uma intensidade de 43,2 mm/h, que provocou uma variação rápida do nível do rio e o acionamento do mecanismo de coleta. Não tendo havido sequência, o evento foi registrado com duas amostras apenas, evidenciando a capacidade interromper a amostragem quando necessário, preservando frascos de coleta para eventos futuros.

Para melhor exemplificar as vantagens da adoção do processo de amostragem inteligente na estação Tamandaré, será apresentada a seguir uma descrição mais detalhada do evento registrado e amostrado entre os dias 10 e 12 de fevereiro

4.2.2 Amostragem Inteligente em um Evento típico – Detalhes de um processo de amostragem

Entre os vários eventos apresentados na Figura 4.6, aquele registrado entre os dias 10 e 12 de fevereiro de 2012 foi escolhido tanto para um estudo mais aprofundado do desempenho do equipamento de amostragem, quanto para a análise dos parâmetros de qualidade de água. Este evento é apresentado em detalhes na Figura 4.7.

Dezessete amostras foram coletadas, tendo sido a primeira às 13:47h do dia 10 de fevereiro e a última à 01:17h do dia 12 de fevereiro, ou seja, em um intervalo de cerca de 35 horas.

Como pode ser observado, a distribuição das amostras foi bastante regular ao longo do evento. Entre as virtudes mais importantes a serem mencionadas está a própria detecção do início de um evento importante. A amostragem começou, efetivamente, no início do evento e sua evolução ocorreu de maneira razoavelmente bem distribuída. O segundo pico, ocorrido em torno das 22:40h do dia 10 deixou de ser registrado por uma pequena margem.

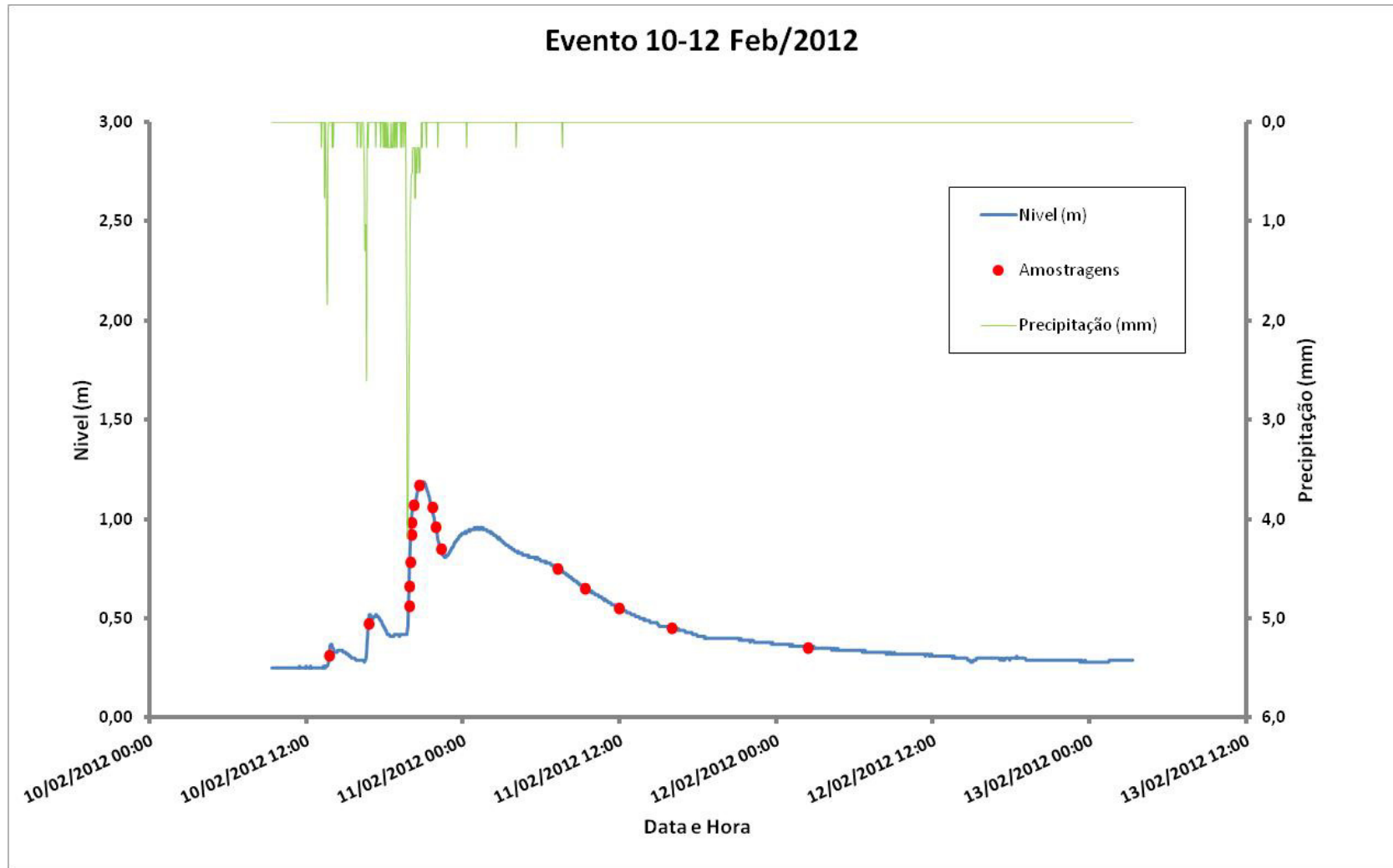


Figura 4.7 – Evento registrado e coletado pelo ISCO - Logger

Como o nível de referência pré-evento era de 0,26 m, as amostragens tendiam a ser realizadas nos momentos em que o nível do rio cruzasse valores de $0,26 + 0,10$ cm (i.e. 0,36 m, 0,46 m, 0,56 m...), quer na subida quanto na recessão.

Após a realização das três primeiras coletas da recessão, as quais foram realizadas nos níveis 1,06 m, 0,96 m e 0,86 m respectivamente, o equipamento detectou a inversão de tendência quando o nível do rio voltou a subir. Entretanto, como o nível do rio não chegou a ultrapassar o valor de 0,96 m, que equivaleria à próxima coleta no sentido de subida de nível, não foi realizada uma coleta de subida antes que a tendência invertesse novamente.

Assim, como a última coleta realizada durante a recessão anterior foi realizada no nível 0,86 m, a coleta seguinte foi realizada na altura 0,76 m, o que propiciou um lapso de cerca de 9 horas, sem que fossem coletadas novas amostras. Com isto uma melhor distribuição de amostragem se configura para uma melhor dimensão da alterações de qualidade da água. No caso em estudo, frequentemente a seção apresenta um segundo pico de vazão, pico este não associado à um recrudescimento da precipitação.

Na Figura 4.8 é apresentada sequência dos frascos de coleta das 17 amostras referentes ao evento ocorrido entre os dias 10 e 12 de fevereiro de 2012. Mesmo contra luz, é possível observar, da esquerda para a direita, a evolução da concentração de sólidos suspensos registrada ao longo do evento, o que fornece um indício importante do sucesso obtido por meio da amostragem inteligente e das peculiaridades da amostragem em benefício de uma melhor avaliação da qualidade da água



Figura 4.8 – Amostras coletadas entre 10 e 12/02/2012

4.2.2.1 Resultados das Análises

As amostras foram analisadas para carbono dissolvido total (CDT), carbono orgânico dissolvido (COD), carbono inorgânico dissolvido (CID), demanda química de oxigênio (DQO), e para a série de sólidos: totais (ST), totais fixos (STF), totais voláteis (STV), suspensos totais (SST), suspensos fixos (SSF), suspensos voláteis (SSV), dissolvidos totais (SDT), dissolvidos fixos (SDF) e dissolvidos voláteis (SDV). Os resultados das análises estão apresentados nos Quadros 4.1 e 4.2. As análises foram realizadas, para determinar a evolução do comportamento dos parâmetros escolhidos ao longo do evento, para que se possa calcular adequadamente a concentração média do evento para cada parâmetro analisado e, ainda, para buscar evidências da existência do fenômeno da lavagem de poluentes, descrita anteriormente.

Quadro 4.1 – Resultados para CTD, COD, CID e DQO

Data e Hora	Nível	CDT	COD	CID	DQO
	(m)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
10/02/2012 13:47	0,31	14,3	8,6	5,7	7,3
10/02/2012 16:47	0,48	15,4	3,0	12,5	8,3
10/02/2012 19:55	0,66	12,6	3,3	9,4	13,7
10/02/2012 19:58	0,78	13,9	3,7	10,2	22,3
10/02/2012 20:00	0,85	12,4	1,5	10,9	36,0
10/02/2012 20:02	0,92	13,0	5,1	8,0	25,0
10/02/2012 20:05	0,97	10,3	2,4	7,9	38,3
10/02/2012 20:12	1,06	9,3	3,8	5,4	11,7
10/02/2012 20:42	1,17	11,3	3,2	8,2	62,3
10/02/2012 21:40	1,06	13,1	7,7	5,4	25,0
10/02/2012 21:57	0,96	8,3	1,5	6,9	60,7
10/02/2012 22:17	0,86	8,9	1,8	7,1	28,7
11/02/2012 07:05	0,76	9,9	3,0	6,8	11
11/02/2012 09:15	0,66	8,7	3,7	5,0	4,3
11/02/2012 11:45	0,56	13,6	6,7	6,9	1,7
11/02/2012 15:05	0,46	9,9	4,5	5,4	2,0
12/02/2012 01:22	0,36	7,1	2,1	5,0	1,3

Quadro 4.2 – Resultados para a série de Sólidos

Data e Hora	Nível	ST	STF	STV	SST	SSF	SSV	SDT	SDF	SDV
	(m)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
10/02/2012 13:47	0,31	338	234	104	66	36	30	272	198	74
10/02/2012 16:47	0,48	490	328	162	274	220	54	216	108	108
10/02/2012 19:55	0,66	472	348	124	286	236	50	186	112	74
10/02/2012 19:58	0,78	672	568	104	452	376	76	220	192	28
10/02/2012 20:00	0,85	746	596	150	444	376	68	302	220	82
10/02/2012 20:02	0,92	648	520	128	478	404	74	170	116	54
10/02/2012 20:05	0,97	664	410	254	336	254	82	328	156	172
10/02/2012 20:12	1,06	700	468	232	494	414	80	206	54	152
10/02/2012 20:42	1,17	1676	1376	300	1398	1220	178	278	156	122
10/02/2012 21:40	1,06	972	726	246	752	664	88	220	62	158
10/02/2012 21:57	0,96	786	596	190	590	492	98	196	104	92
10/02/2012 22:17	0,86	722	500	222	552	450	102	170	50	120
11/02/2012 07:05	0,76	442	342	100	228	176	52	214	166	48
11/02/2012 09:15	0,66	392	270	122	190	144	46	202	126	76
11/02/2012 11:45	0,56	336	224	112	110	82	28	226	142	84
11/02/2012 15:05	0,46	296	164	132	108	74	34	188	90	98
12/02/2012 01:22	0,36	270	150	120	32	22	10	238	128	110

4.2.2.2 A Lavagem Inicial

No que concerne ao transporte de poluentes durante o evento, explora-se a evolução do nível em função do tempo com as concentrações de sólidos totais (Figura 4.9) e Carbono Orgânico Total (Figura 4.10) das amostras coletadas.

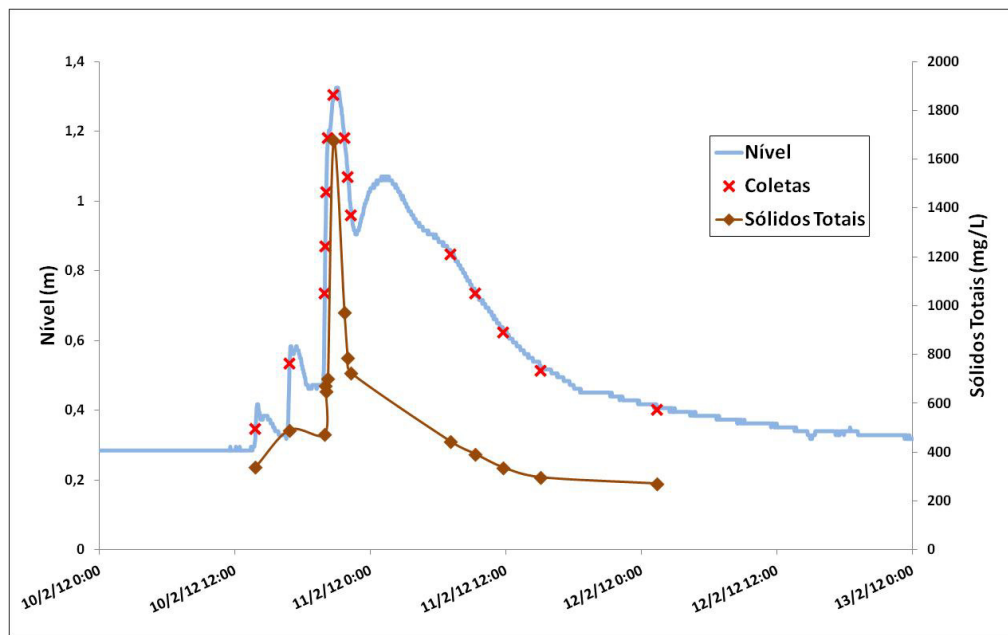


Figura 4.9 – Variação temporal de Sólidos Totais

As concentrações iniciais de sólidos totais são mais baixas, e elevam-se até o patamar de 500 mg/L durante a ascensão do nível, permanecendo neste patamar até a ocorrência do pico do evento, momento no qual ocorre uma súbita elevação da concentração, para o patamar de 1.700 mg/L. Tal elevação permite supor que existe um patamar de escoamento a partir do qual uma grande quantidade de sólidos é transportada através da seção.

Como a seção está instalada em uma região em que o fundo do rio é de pedras de diversos tamanhos, e considerando que a velocidade de escoamento é próxima de 1m/s mesmo com o rio baixo, é pouco provável que exista estratificação vertical de concentrações perceptível durante eventos de maior vazão, hipótese que só pode ser comprovada se coletas manuais forem efetuadas durante a ocorrência de um evento semelhante.

A concentração da primeira amostra da recessão fica no patamar de 1.000 mg/L, e retrocedendo para o patamar de 700 mg/L nas duas amostras seguintes.

Interessante ressaltar que, durante a recessão, as concentrações de sólidos retrocedem a patamares próximos aos observados no início do evento mesmo enquanto o nível na seção permanece alto. Neste caso, fica caracterizado o efeito da diluição.

Para este evento, o pico da concentração de sólidos totais coincide com o momento em que o nível é mais elevado, sugerindo que uma parcela importante do transporte de sólidos pela seção ocorre no período inicial do evento.

A evolução do transporte de Carbono Orgânico Dissolvido Total, por sua vez, é de difícil interpretação, como pode ser observado na Figura 4.10. As maiores concentrações são registradas nos instantes iniciais do evento, ocorrendo uma provável diluição com o aumento da vazão. A apresentação nível ou vazão x concentração não facilita a interpretação da evolução do transporte deste e de outros parâmetros de qualidade da água.

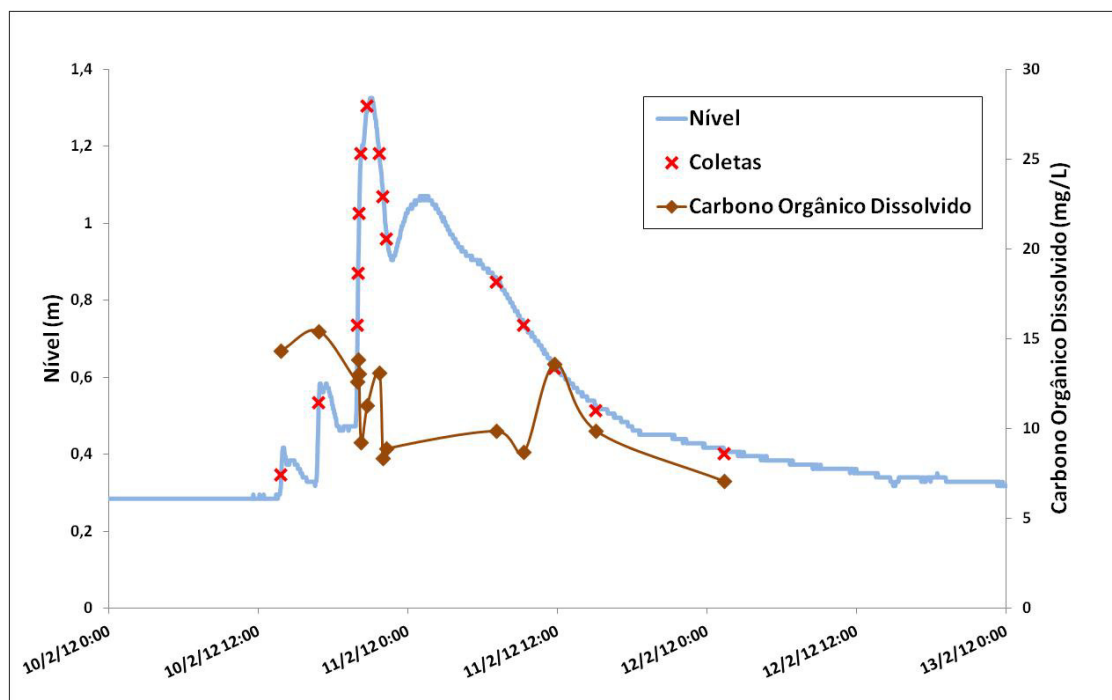


Figura 4.10 – Variação Temporal de COD

Para facilitar a compreensão do comportamento dos poluentes com o desenrolar do evento, a seguir serão apresentados os passos da construção das curvas para a Lavagem Inicial Baseada em Massa (MBFF – *mass based first flux*).

A figura 4.11 apresenta o hidrograma do evento obtido a partir da curva de descarga em acordo com a equação 3, a seguir. A Figura 4.12 destaca a curva acumulada para o mesmo evento.:

$$Q = 3,1517[nível + 0,07941]^{1,0907} \quad (3)$$

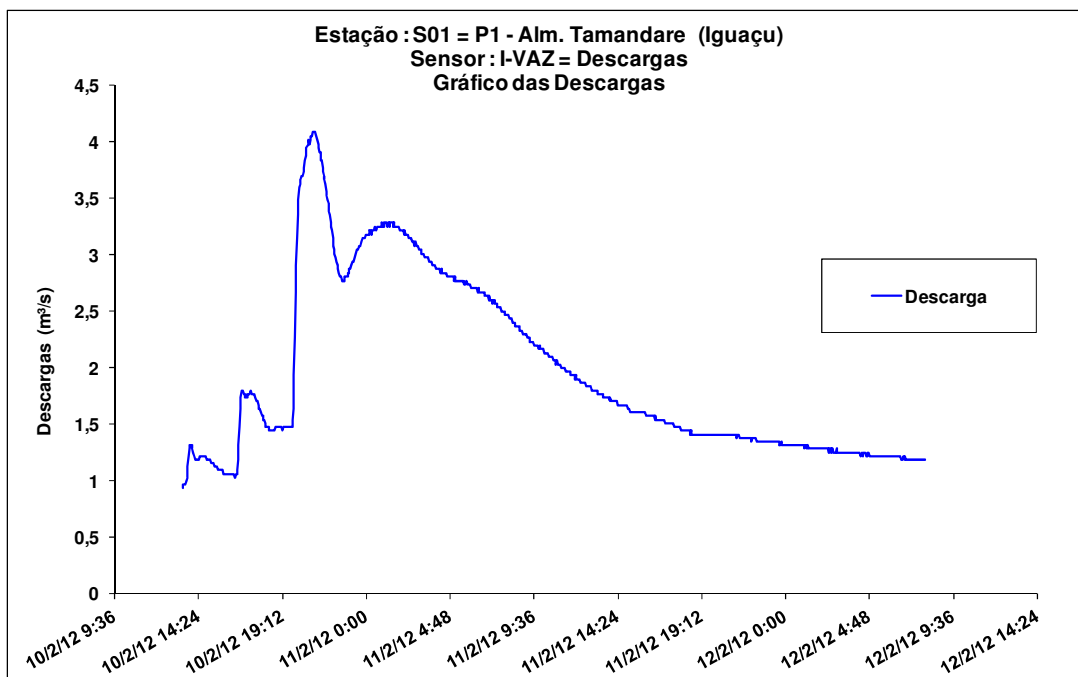


Figura 4.11 – Descarga Instantânea para o Evento

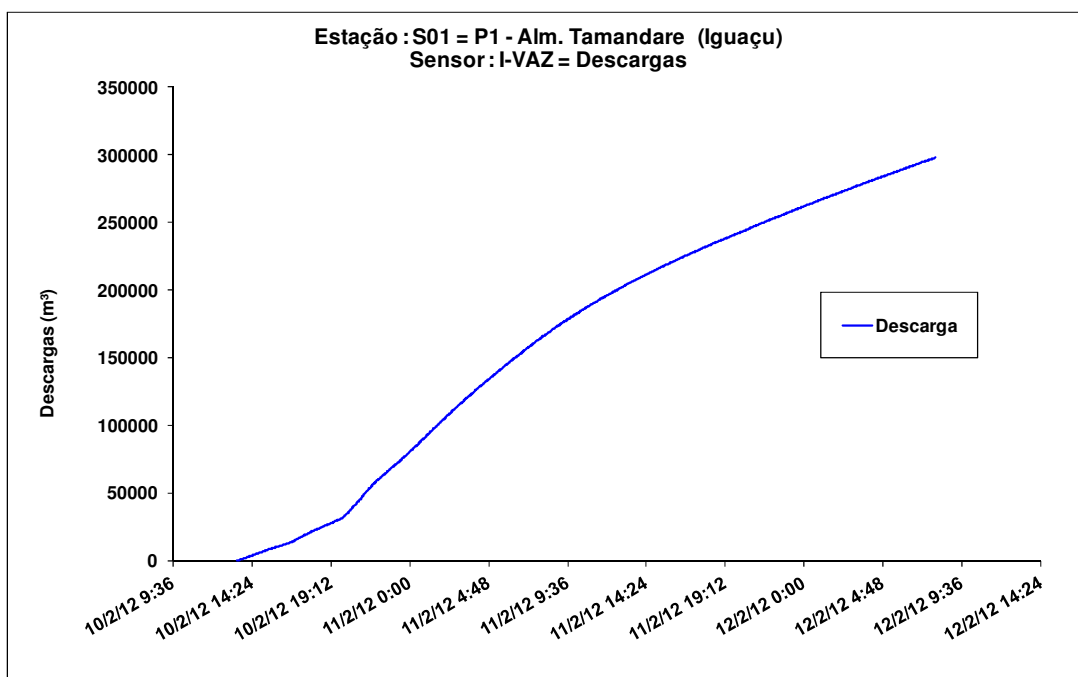


Figura 4.12 – Descarga acumulada para o evento

Assim, pode-se observar a evolução temporal do transporte durante o episódio em destaque, representando um evento de um volume de 300.000 m³ em 40 horas

aproximadamente. Interpolando valores para as concentrações nos intervalos entre as coletas realizadas, é possível calcular a massa total transportada para cada parâmetro, e a sua evolução temporal.

Os valores individuais foram divididos pelo total transportado para cada parâmetro, para construir séries unitárias que representassem a evolução temporal dos parâmetros analisados. Estas séries são apresentadas contra a série unitária que foi construída, pelo mesmo método, para o volume transportado. O resultado é uma curva unitária representativa do comportamento do parâmetro estudado, conforme pode ser observado na Figura 4.13.

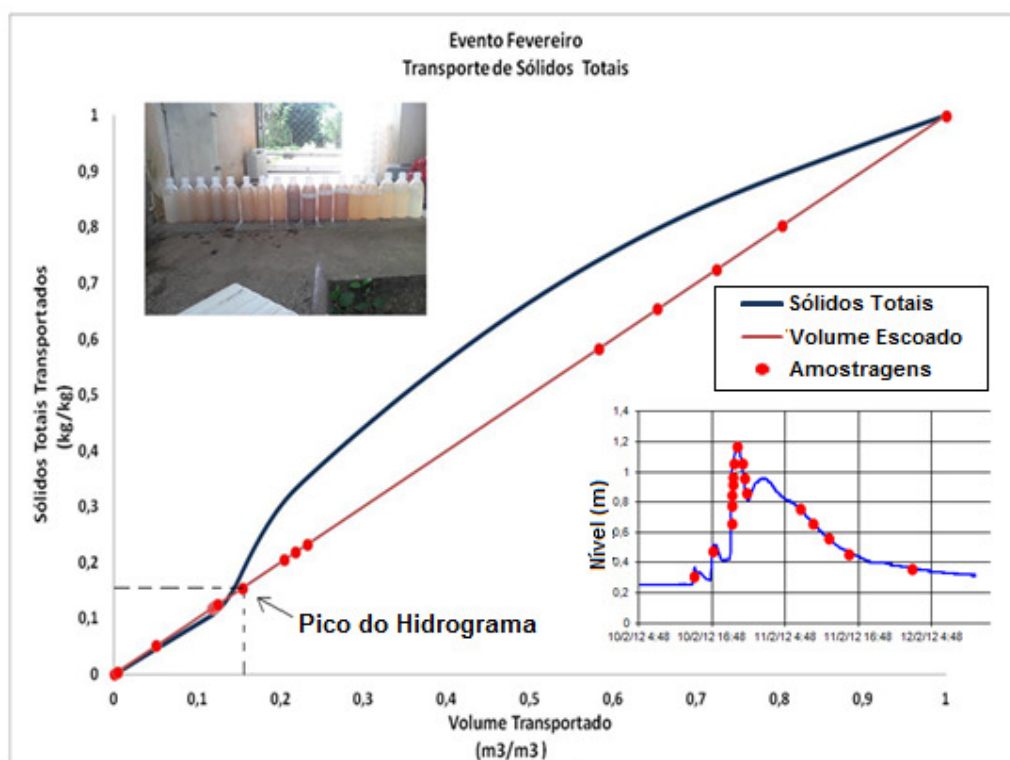


Figura 4.13 – Transporte Unitário para Sólidos Totais

A análise da Figura 4.13 permite observar a evolução do transporte de sólidos totais (ST) ao longo do evento em destaque. A reta representa a situação conceitual em que a evolução do transporte do volume líquido ocorre de maneira idêntica à evolução do transporte de sólidos totais. A curva representa a defasagem entre o percentual do volume e o percentual da massa de sólidos totais transportados através da seção de controle, para cada instante de tempo.

Pode-se observar que até o pico do hidrograma, que ocorre quando 15% do volume total do evento passou pela seção, o transporte de sólidos totais acompanha o volume transportado. Após esse instante, o transporte de sólido

s totais aumentou de tal modo que, quando o escoamento representa 30% do volume total do evento, cerca de 45% da massa total de sólidos para o evento tinha sido transportada pela seção, o que parece indicar que para o parâmetro sólidos totais, o fenômeno da lavagem inicial (*first flux*) não ocorre imediatamente na seção representada pela estação Tamandaré do rio Barigui, mas com certo atraso, de modo que seu início coincide com o pico da vazão.

No tocante à concentração de Carbono Orgânico Dissolvido (COD), Figura 4.14, observa-se um comportamento distinto de Sólidos Totais, com transporte de COD similar ao ao volume transportado através da seção.

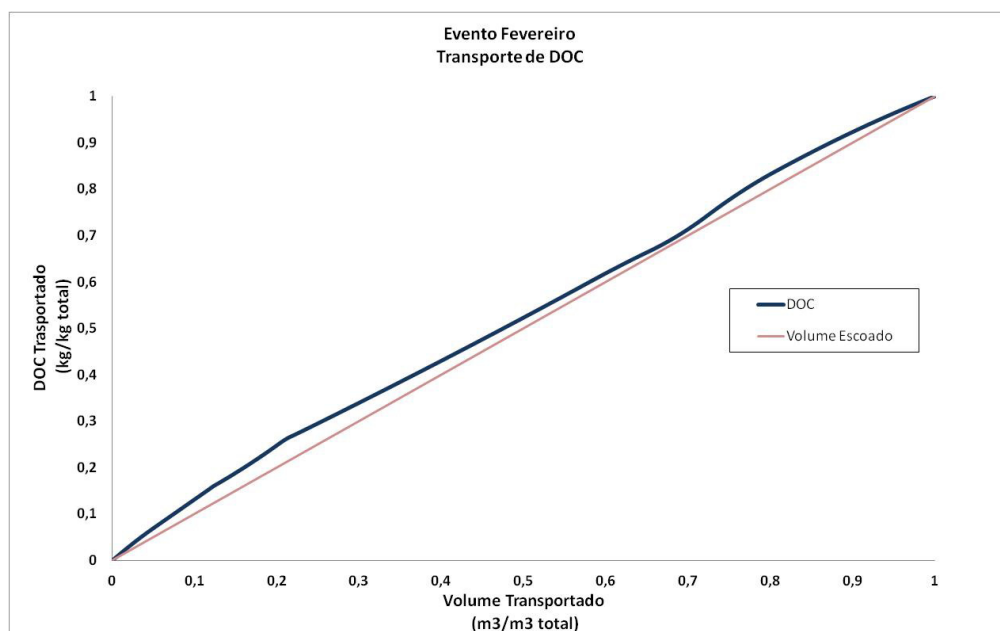


Figura 4.14 – Transporte Unitário para Carbono Total

Cabe salientar que o comportamento da Demanda Química de Oxigênio (DQO) foi diferenciado. Na Figura 4.15 é apresentado o comportamento do transporte da massa de DQO com o volume de água escoado na seção.

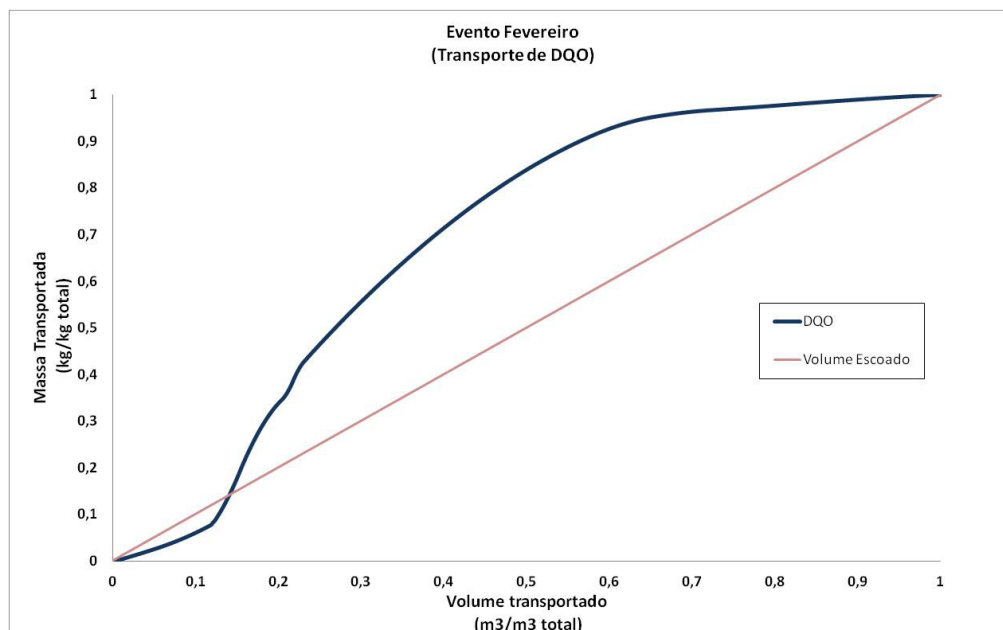


Figura 4.15 – Transporte Unitário para DQO

Aparentemente, após um período inicial em que ocorreu um certo retardo no transporte da DQO, a situação inverteu acentuadamente após o pico de vazão, pois para 30% do volume escoado, tem-se aproximadamente 60% da carga de DQO (vazão x concentração) transportada através da seção, o que fornece indícios de uma diferença entre transporte de sólidos e o transporte de poluentes quimicamente degradáveis, corroborando a tese de que o efeito de aporte de poluentes a partir do escoamento superficial bastante influenciado pela natureza orgânica dos elementos a partir das características de uso e ocupação do solo.

Para efeitos comparativos, na Figura 4.16 é apresentado em um único gráfico os transportes unitários apresentados para os três parâmetros (sólidos totais, DQO, COD).

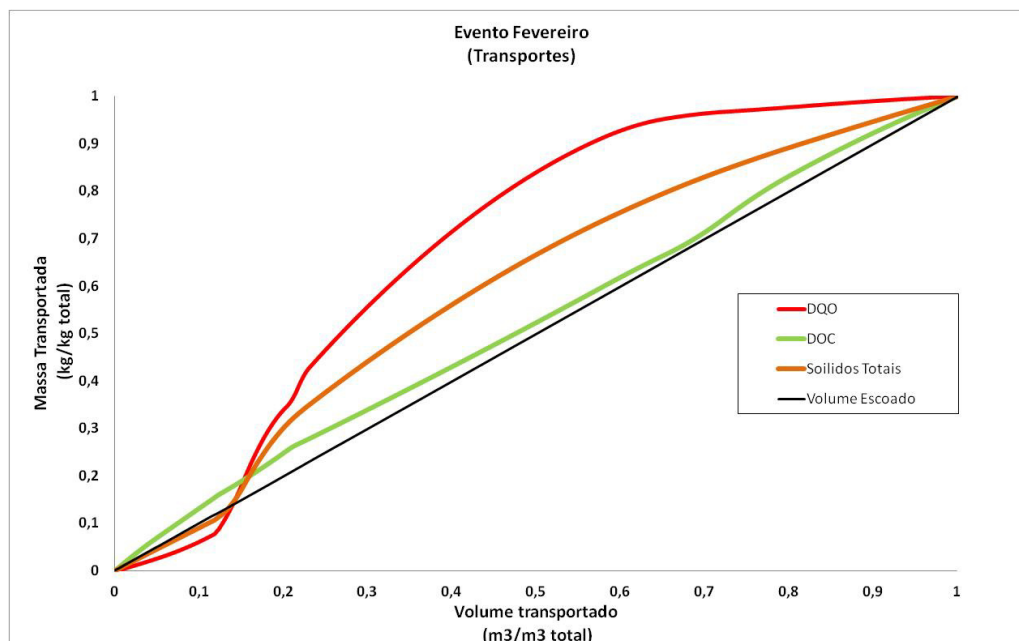


Figura 4.16 – Comparativo entre DQO, CTD E SÓLIDOS TOTAIS

Pode-se observar que o transporte de COD é defasado em relação ao transporte dos sólidos totais, e que a DQO apresenta um comportamento bem diferenciado para o ponto de monitoramento indicado.

4.2.2.3 A Concentração Média do Evento (EMC)

Os resultados das análises foram utilizados para o cálculo do EMC, de acordo com metodologias descritas na seção 2.1.5.. Resultados para os parâmetros analisados (sólidos totais, sólidos suspensos, fixos e voláteis) são apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Resultados de Cálculo do EMC para a Série de Sólidos

Evento Fevereiro	EMC(mg L ⁻¹)					
	ST	STF	STV	SST	SSF	SSV
	710	531	179	484	406	78

4.3 AS VANTAGENS DA AMOSTRAGEM INTELIGENTE

A identificação das vantagens da amostragem inteligente somente pode ser considerada completa se feita por comparação, isto é, por meio da utilização de dois processos de amostragem diferentes, independentes e plenamente operacionais, para um mesmo evento. Neste contexto, estudo comparativo foi realizado para quantificar as diferenças entre a amostragem inteligente e a amostragem temporizada – a amostragem mais comumente utilizada para estudos de poluição difusa.

4.3.1 Comparação entre e Amostras Inteligente e Temporizada

As vantagens da amostragem inteligente podem ser demonstradas pela análise da duração dos principais eventos de cheia registrados no primeiro bimestre de 2012 na Estação Tamandaré, apresentados na Figura 4.6, os quais variaram entre 19 e 60 horas.

Esta variação impõe uma forte limitação ao uso da amostragem temporizada, pois, se o operador decidisse pela adoção de uma amostragem horária, por exemplo, os eventos de menor duração seriam beneficiados por uma maior resolução da amostragem, em detrimento dos eventos mais longos, que passariam a ser subamostrados. A adoção de intervalos mais longos inverteria o problema, que não seria eliminado.

Um exemplo de subamostragem pode ser observado na Figura 4.17, que representa o mesmo evento analisado na seção 4.2.2. Considerando que o evento tem duração de cerca de 48 horas, uma amostragem temporizada com intervalos de 2h foi adotada.

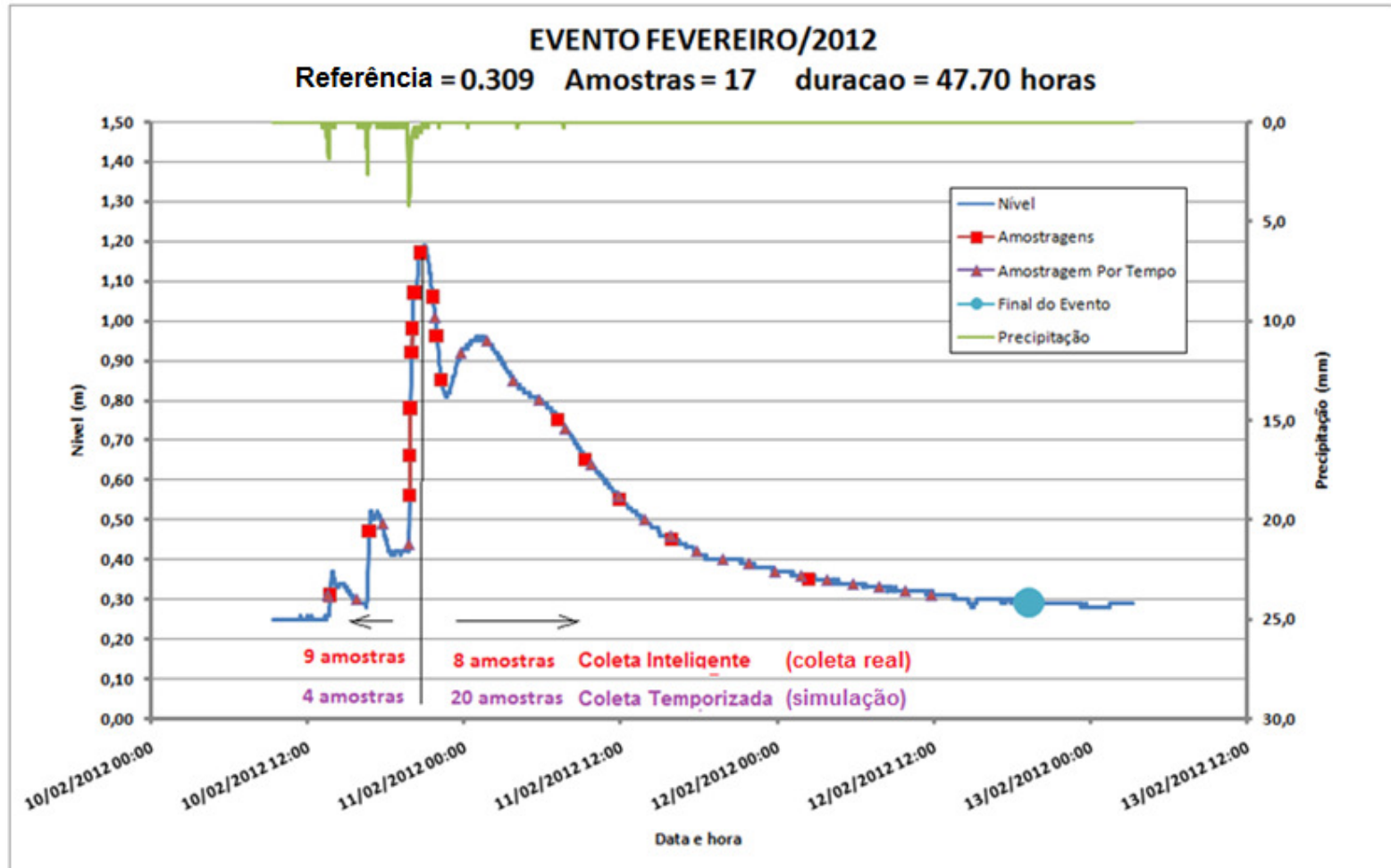


Figura 4.17 – Amostragem inteligente vs. Amostragem temporizada – Evento de Fevereiro de 2012

No Quadro 4.4 são apresentadas e ressaltadas as diferenças entre os dois processos de amostragem para o mesmo evento, cujas características principais são uma duração de 47h 42min, nível da primeira amostragem em 30 cm, tempo até o pico do nível em 7h 22min, e 40h 20 min de recessão, havendo um dpis picos secundários antes do máximo.

Quadro 4.4 – Amostragem Inteligente versus Amostragem Temporizada

CARACTERÍSTICA	AMOSTRAGEM INTELIGENTE	AMOSTRAGEM TEMPORIZADA
número de coletas na elevação	9	4
número de coletas na recessão	8	20

O efeito da concentração da amostragem na recessão sobre o resultado dos cálculos para o EMC pode ser inferido se forem interpolados os resultados das concentrações para os pontos simulados da amostragem temporal a partir dos resultados das análises reais coletadas pelo processo de amostragem inteligente.

Com estes valores das concentrações obtidas por interpolação, novos valores do EMC foram calculados para cada um dos parâmetros analisados neste evento.

No Quadro 4.5 são apresentados os resultados reais da amostragem inteligente para a série de sólidos. No Quadro 4.6, são apresentados os valores das concentrações, obtidas por interpolação, para os instantes em que um amostrador temporizado teria realizado a coleta das amostras ao longo do evento, conforme demonstrado na Figura 4.17.

Quadro 4.5 – Resultados da Amostragem Inteligente

AMOSTRAGEM	DATA	NÍVEL	VAZÃO	SST	SSF	SSV	ST	STF	STV
	HORA	(m)	(m ³ /s)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
1	10/02/2012 13:47	0,31	1,26	66	36	30	338	234	104
2	10/02/2012 16:47	0,48	1,87	274	220	54	490	328	162
3	10/02/2012 19:55	0,66	2,53	286	236	50	472	348	124
4	10/02/2012 19:58	0,78	2,98	452	376	76	672	568	104
5	10/02/2012 20:00	0,85	3,25	444	376	68	746	596	150
6	10/02/2012 20:02	0,92	3,51	478	404	74	648	520	128
7	10/02/2012 20:05	0,97	3,71	336	254	82	664	410	254
8	10/02/2012 20:12	1,06	4,06	494	414	80	700	468	232
9	10/02/2012 20:42	1,17	4,48	1398	1220	178	1676	1376	300
10	10/02/2012 21:40	1,06	4,06	752	664	88	972	726	246
11	10/02/2012 21:57	0,96	3,67	590	492	98	786	596	190
12	10/02/2012 22:17	0,86	3,29	552	450	102	722	500	222
13	11/02/2012 07:05	0,76	2,91	228	176	52	442	342	100
14	11/02/2012 09:15	0,66	2,53	190	144	46	392	270	122
15	11/02/2012 11:45	0,56	2,16	110	82	28	336	224	112
16	11/02/2012 15:05	0,46	1,79	108	74	34	296	164	132
17	12/02/2012 01:22	0,36	1,43	32	22	10	270	150	120

Quadro 4.6 – Resultados da amostragem Temporizada (Interpolados)

AMOSTRAGEM	DATA	NÍVEL	VAZÃO	SST	SSF	SSV	ST	STF	STV
	HORA	(m)	(m ³ /s)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
1	10/02/2012 13:47	0,31	1,26	59	42	17	276	183	93
2	10/02/2012 15:47	0,30	1,22	66	36	30	338	234	104
3	10/02/2012 17:47	0,49	1,90	170	128	42	414	281	133
4	10/02/2012 19:47	0,44	1,72	278	225	53	484	335	149
5	10/02/2012 21:47	1,02	3,90	282	231	51	478	341	137
6	10/02/2012 23:47	0,92	3,51	671	578	93	879	661	218
7	11/02/2012 01:47	0,95	3,63	487	395	92	666	468	198
8	11/02/2012 03:47	0,85	3,25	422	340	82	610	437	173
9	11/02/2012 05:47	0,80	3,06	358	286	72	554	405	149
10	11/02/2012 07:47	0,73	2,79	293	231	62	498	374	124
11	11/02/2012 09:47	0,64	2,46	209	160	49	417	306	111
12	11/02/2012 11:47	0,56	2,16	150	113	37	364	247	117
13	11/02/2012 13:47	0,5	1,94	109	79	30	323	204	119
14	11/02/2012 15:47	0,46	1,79	109	77	32	309	184	125
15	11/02/2012 17:47	0,42	1,65	103	70	32	294	163	131
16	11/02/2012 19:47	0,40	1,58	88	60	28	289	160	129
17	11/02/2012 21:47	0,39	1,54	73	50	23	284	158	127
18	11/02/2012 23:47	0,37	1,47	58	40	18	279	155	124

Para efeito de comparação, no Quadro 4.7 são apresentados os resultados obtidos para o EMC da série de sólidos, reais e simulados, no evento, sendo ressaltadas as diferenças nos valores obtidos pelos dois processos de amostragem.

Quadro 4.7 – Diferença nos valores de EMC

	EMC (mg/L)							
	ST	STF	STV	SST	SSF	SSV	COT	DQO
Amostragem Inteligente	763	574	189	536	452	84	11,1	28
Simulação Amostragem Temporizada	431	293	138	224	177	46	10,4	10
Diferença	-43%	-49%	-27%	-58%	-61%	-45%	-6,3%	-64%

A magnitude das diferenças observadas decorre, principalmente, da distribuição inadequada das amostragens temporizadas durante o evento. O intervalo de 2 horas entre amostragens subsequentes revelou ser muito extenso, pois nenhuma amostragem foi realizada durante a elevação principal de nível. O processo temporizado coletou amostras predominantemente no período da recessão, no qual o efeito da diluição é mais presente, o que resultou em valores mais baixos para o EMC.

É importante ressaltar que, para não comprometer a comparação, a distribuição temporal simulada é iniciada no mesmo momento em que ocorre a primeira amostragem inteligente, ou seja, a amostragem temporizada foi beneficiada pelo mecanismo de detecção de variação de nível que faz iniciar a amostragem inteligente. Tal situação não ocorreria em um sistema real de amostragem temporizada, que geralmente é iniciado pelo acionamento de uma boia de nível. Por isso, é provável que as diferenças calculadas estejam subestimadas.

4.4 ANÁLISE CRÍTICA

A utilização do nível como variável hidrológica dinâmica provou ser viável em campo. Com o auxílio de equipamentos disponíveis no mercado foi possível montar uma plataforma de coleta de amostras inteiramente operacional e robusta.

O programa elaborado para o *datalogger* da estação Tamandaré conseguiu comandar a coleta de amostras de maneira eficiente e econômica. Aos equipamentos da estação, além do programa, foram adicionados apenas a interface de comunicação e os cabos necessários para a conexão com o amostrador.

A leitura do nível da seção, que já era realizada pelos equipamentos originalmente instalados na seção foi utilizada, com sucesso, para controlar o processo de amostragem, caracterizando a amostragem inteligente.

A interface de comunicação, apesar de simples e econômica, realizou adequadamente a tarefa de transmitir pulsos de comando do *datalogger* para o amostrador ISCO.

O esquema foi operado durante 15 meses, sem que fossem registrados problemas operacionais importantes, o que demonstra a confiabilidade da amostragem inteligente, baseada na utilização do nível como variável hidrológica dinâmica.

Os resultados obtidos indicam a eficiência do processo inteligente de coleta de amostras, testado pela junção ISCO® + *Datalogger* + Programação Específica.

A programação efetuada no *Datalogger* mostrou ser adequada para comandar a realização de amostragem por meio do amostrador, o que ficou provado nos primeiros meses do monitoramento, nos quais todos os eventos importantes foram devidamente amostrados.

No evento ocorrido entre os dias 10 e 12 de fevereiro de 2012, apresentado com exemplo, ficou demonstrada uma boa distribuição da coleta das amostras pelo mecanismo da amostragem inteligente;

Os resultados das análises efetuadas nas amostras coletadas demonstraram que o a amostragem inteligente foi capaz de detectar a ocorrência do fenômeno da lavagem inicial para alguns parâmetros de qualidade de água (Sólidos Totais e DQO) e a ausência deste mesmo fenômeno para outros parâmetros (COT), o que reforça a importância da ferramenta de amostragem.

Os resultados para a série de sólidos foram utilizados para o cálculo da Concentração Média do Evento (EMC) para as amostras coletadas pelo método da amostragem inteligente.

Uma amostragem temporizada foi simulada, com o intervalo entre coletas ajustado para 2h. Os valores das concentrações para os instantes em que seriam realizadas as coletas temporizadas foram obtidos por interpolação linear entre as concentrações reais das amostras coletadas pelo método da amostragem inteligente. Valores calculados para o EMC

com base neste novo conjunto de dados revelaram-se 37% inferiores, em média, aos valores obtidos com as amostras reais coletadas pelo método da amostragem inteligente.

Suspeita-se que as diferenças sejam ainda maiores, pois a comparação foi feita levando-se em conta que as amostragens inteligente e temporizada foram iniciadas no mesmo instante de tempo. Esta coincidência não ocorreria na prática pois nos esquemas de amostragem temporizadas o início das coletas é disparado por boias de nível as quais, por serem dispositivos fixos, não acompanham as variações de nível que dispararam a amostragem inteligente.

Um estudo comparativo real entre as amostragens temporizada e inteligente somente é possível se dois conjuntos amostradores estiverem instalados na mesma seção, e se o estudo puder ser replicado em várias seções de um mesmo rio. Esta situação que reforça a demanda pelo desenvolvimento de um amostrador automático completo, que seja capaz de realizar coletas de amostras pelo método da amostragem inteligente, e que seja economicamente viável para o estudo. O desenvolvimento de um equipamento com estas características é relatado na próxima seção.

CAPÍTULO 5

O Amostrador Automático Microprocessado SBN

“I learned quickly, as I tell my graduate students now, there is no answers in the back of the book when the equipment doesn’t work or the measurements look strange”
Martin Lewis Perl –Physics Nobel Laureate

Os estudos sobre os processos de transporte de poluentes por via difusa tem por limitação não somente nas deficiências técnicas dos equipamentos disponíveis no mercado, mas também nos seus elevados custos de implantação e operação. Se o bom conhecimento da bacia hidrográfica em estudo demandar a instalação de vários pontos de controle e coleta, estes custos podem chegar à casa das centenas de milhares de reais.(RODE *et al*, 2011).

A busca por alternativas que viabilizem a realização de um número maior de estudos é constante e está refletida nos amostradores ANA e AND, descritos no capítulo 3.

O desenvolvimento que será apresentado nesta seção reflete os esforços dispendidos no desenvolvimento de um equipamento alternativo que pudesse oferecer características superiores aos ANAs e ANDs.

Desde sua concepção original até a versão atual, denominada SBN o equipamento sofreu grandes modificações. As informações que serão apresentadas a seguir referem-se à ultima versão, microprocessada, do amostrador, à qual foi incorporado o princípio da amostragem inteligente.

O concepção, projeto e desenvolvimento do SBN foram orientados pela busca da excelência na coleta de amostras e pelo baixo custo de produção, para viabilizar a realização de estudos no Brasil.

Um histórico do desenvolvimento, com detalhes das versões anteriores (BRAGA *et al*, 2007) pode ser encontrado no Anexo 1 deste documento.

5.1 CONCEPÇÃO E CAPACIDADES

O amostrador SBN é composto por uma unidade microprocessada de controle, um conjunto de frascos para coleta de amostras, uma estação de bombeamento e um sistema de distribuição de fluxo capaz que faz a escolha do frasco a ser preenchido ou esvaziado.

Suas principais características inovadoras são:

1. Capacidade de expansão quase ilimitada do número de frascos para coleta de amostras individuais;
2. Capacidade de leitura de nível incorporada ao amostrador, mesmo na versão mais simples;
3. Capacidade de realizar coletas pelo processo de amostragem inteligente;
4. Capacidade para realizar o descarte automático de amostras indesejadas coletiva ou individualmente – que será implementada na segunda versão operacional do equipamento;
5. Capacidade para efetuar leituras de um ou mais sensores adicionais de forma que a decisão, sobre como e quando coletar amostras, seja tomada com base na combinação de resultados da leitura dois ou mais parâmetros, a ser desenvolvida para a segunda versão operacional do equipamento
6. Baixo consumo de energia – autonomia de 10 dias com baterias de 7Ah;
7. Possibilidade de refrigeração desde que alimentado por baterias mais potentes;
8. Baixo custo de fabricação.

Na Figura 5.1, é apresentada a concepção física do amostrador SBN. O equipamento consiste em um conjunto de frascos, uma unidade de bombeamento e um conjunto de válvulas-solenóide do tipo normalmente fechada.

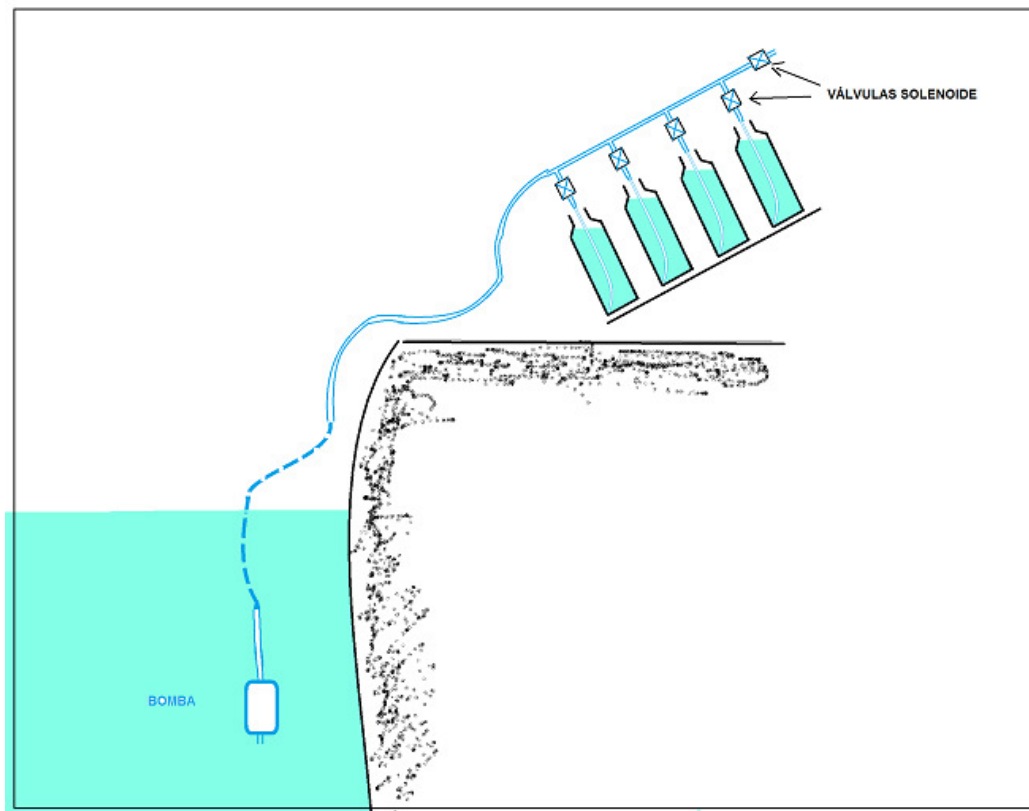


Figura 5.1 – Concepção do SBN

Os volumes coletados pelo amostrador são armazenados em frascos de polietileno comuns, usualmente encontrados no mercado, que permanecem abertos antes e depois da coleta. O enchimento é realizado pela boca, através de um tubo plástico que alcança o fundo do frasco.

Os frascos são montados sobre uma plataforma inclinada de forma a facilitar a decantação de sedimentos na região onde está instalado o tubo de alimentação. Uma pequena bomba de recalque, submersa, produz a pressão necessária para o enchimento rápido dos frascos.

Um módulo microprocessado lê o nível do rio a cada 150 segundos e, utilizando o processo de amostragem inteligente já descrito no capítulo anterior, comanda a ligação da bomba e o abertura e fechamento de válvulas para efetuar a coleta de amostras.

O processo de amostragem é conduzido de acordo com a Figura 5.2 e com a sequência lógica apresentada a seguir:

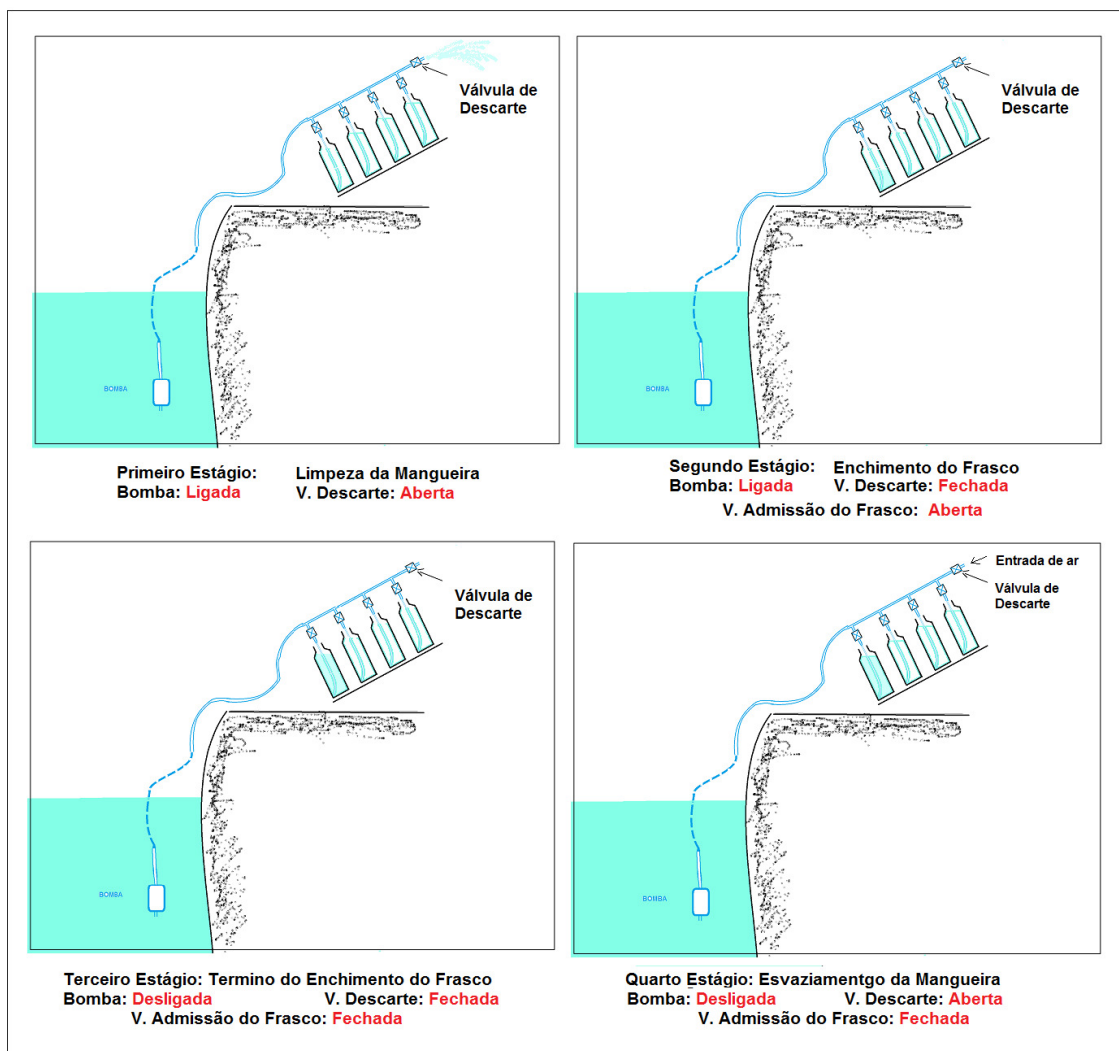


Figura 5.2 – Sequência de Coleta de Amostras

1. É ligada a bomba de recalque;
 - a. Ao mesmo tempo é aberta a válvula de descarte;
2. São aguardados 5 segundos para que comece a escoar água pela válvula de descarte – para fazer a limpeza de qualquer resíduo que tenha permanecido na mangueira do equipamento;
3. É aberta a válvula de admissão do frasco que se deseja encher;
 - a. Ao mesmo tempo a válvula de descarte é fechada;
4. São aguardados mais 25 segundos para enchimento do frasco de amostragem;
5. É fechada a válvula de admissão do frasco;
 - a. Ao mesmo tempo a bomba é desligada

- b. Ao mesmo tempo a válvula de descarte é aberta
6. São aguardados 30 segundos com a válvula de descarte aberta para que o líquido contido na mangueira possa descer, por gravidade, de volta ao rio;
7. A rotina de amostragem é encerrada.

O equipamento possui também a inovadora capacidade de efetuar o descarte das amostras coletadas, que pode ou não ser habilitada, à critério do pesquisador.

Esta capacidade se justifica pela melhor utilização das garrafas de coleta, em especial nos casos em que o aparelho for dotado de um pequeno número de garrafas – a primeira versão operacional do SBN, utilizada neste estudo, tem capacidade para 12 garrafas de coleta.

Nos casos em que o aparelho, tendo iniciado a amostragem, perceber que um número mínimo de coletas não foi alcançado ao final do evento, poderá descartar as amostras coletadas, esvaziando as garrafas de modo a restabelecer sua plena capacidade para um evento futuro. Na Figura 5.3 é apresentado o mecanismo de descarte de amostras do SBN.

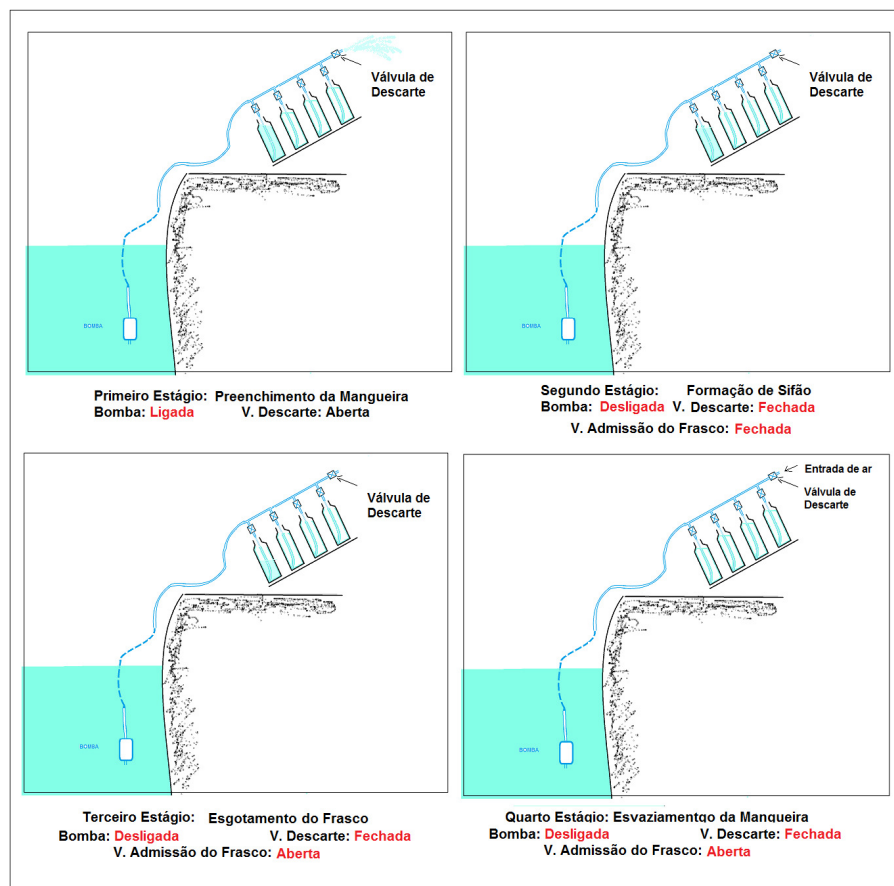


Figura 5.3 – Sequência de Descarte de Amostras

1. É ligada a bomba de recalque;
 - a. Ao mesmo tempo é aberta a válvula de descarte;
2. São aguardados 5 segundos para que comece a escoar água pela válvula de descarte;
3. É fechada a válvula de descarte;
 - a. Ao mesmo tempo é interrompido o bombeamento. Como não existe válvula de retenção na bomba, é formado um sifão;
4. É aberta a válvula de admissão ao frasco correspondente à amostra que se quer descartar – começa o descarte por sifonamento;
5. A válvula é mantida aberta por cerca de dois minutos para o descarte completo da amostra;
6. É fechada a válvula de admissão do frasco, encerrando a rotina de o descarte da amostra;

5.2 AMOSTRADOR SBN – PRIMEIRA VERSÃO OPERACIONAL

Tanto a amostragem inteligente quando a execução das rotinas de coleta e descarte de amostras demandam a utilização de um microprocessador no módulo de comando eletrônico do SBN

O módulo de comando microprocessado do SBN foi construído com base na tecnologia desenvolvida pela Texas para os microprocessadores MSP430.

A escolha destes microprocessadores decorre de algumas características importantes, a saber:

- Consumo de energia inexpressivo quando em modo de espera (*Low Power Mode*) permite maior autonomia de funcionamento;
- Programação em linguagens Assembly ou C;
- Disponibilidade de várias versões de processadores com maior ou menor quantidade de dispositivos periféricos integrados;
- Versões simples muito potentes com baixo custo de aquisição;
- Facilidade de transferência da programação de uma versão para outra;

Neste trabalho, o microprocessador adotado é o MSP430G2553, da família 2, o qual pode ser montado por sobre uma placa de protótipos sem maiores dificuldades. Esta versão do MSP430 possui 14 portas de comunicação I/O, as quais podem ser programadas tanto como portas de entrada ou de saída de sinais.

Para iniciar a descrição de como processador é utilizado para o comando do equipamento, serão relacionadas algumas funções fundamentais do aparelho.

1. Foi implementado um relógio RTC (*real time clock*) para oferecer a base de tempo de funcionamento do amostrador;
2. O número de portas de entrada/saída existentes no processador define a quantidade de frascos do amostrador
3. Das 14 portas existentes na versão utilizada no protótipo operacional, 12 são utilizadas para a abertura das válvulas de admissão dos frascos de coleta;
4. A 13ª porta é utilizada para a leitura de nível;
5. A última porta é utilizada para enviar um sinal para o datalogger da estação hidrométrica, que fará o registro do histórico da realização das coletas ;

A programação implementada segue a lógica descrita no processo de amostragem inteligente. Suas principais características e rotinas serão apresentadas no fluxograma a de funcionamento, apresentado na Figura 5.4.

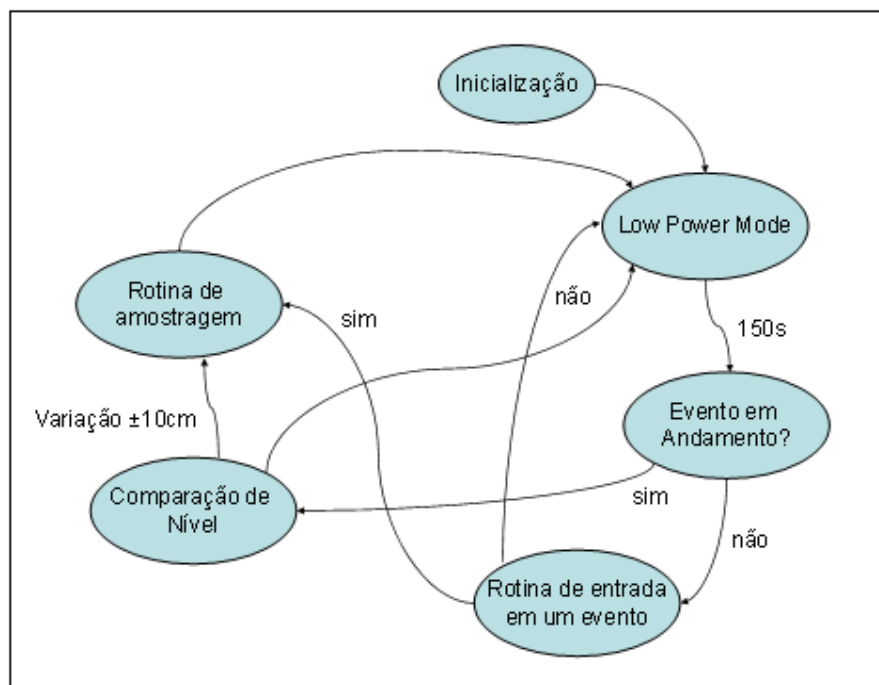


Figura 5.4 – Esquema de funcionameto do SBN

1. *Low Power Mode* – o processador permanece adormecido enquanto seu relógio conta 150s (valor que pode ser ajustado conforme a conveniência). Ao término de cada intervalo de tempo, é realizada uma leitura de nível que será utilizada nas outras rotinas.

2. *Evento em Andamento?* – o processador verifica se não está em andamento um evento, direcionando o programa para a rotina de detecção de início de um evento ou para as rotinas que fazem o acompanhamento de um evento previamente iniciado;
3. *Rotina de Entrada em um Evento* – faz a detecção do início de um evento, comparando a leitura de nível atual com a registrada 10 minutos atrás. O protótipo em funcionamento identifica o início de um evento se a variação de nível em 10 minutos for superior a 5 centímetros. Em caso positivo, direciona o programa para a rotina de amostragem. Em caso negativo, direciona o programa para a espera em *Low Power Mode*;
4. *Rotina de Amostragem* – dispara o processo de coleta de amostras, abrindo e fechando válvulas e ligando o bombeamento por tempo suficiente para o enchimento dos frascos de coleta. No caso da Estação Tamandaré, o tempo de enchimento está na casa dos 30s. Esta rotina também faz o registro dos frascos preenchidos, controlando a amostragem;
5. *Rotina de Comparação de Nível* – se um evento estiver em andamento, esta rotina faz a comparação entre a leitura do nível atual e o nível no qual foi efetuada a última coleta. Quando a diferença for igual ou superior a 10 cm, que é o valor ajustado para a Estação Tamandaré, o programa é encaminhado para uma nova amostragem, tanto no sentido de elevação do nível quanto na recessão;

Por ser dotado de um microprocessador MSP430 de versão simples, o processo de descarte descrito neste capítulo, embora testado em laboratório, não foi implementado na primeira versão operacional do amostrador. Esta decisão foi tomada para que o aparelho pudesse ter doze portas disponíveis para frascos de coleta.

A unidade de comando foi construída em placas perfuradas, padrão para desenvolvimento de protótipos, com tamanho de 10 x 10 cm. O circuito foi dividido em três partes, sendo a primeira placa reservada para fonte de energia, a segunda comportando o microprocessador e as conexões para a porta de leitura do sensor de nível e para a porta reservada para o aviso de amostragem em andamento. A terceira placa foi reservada para os relés desacopladores e as conexões físicas para a ligação da bomba e das válvulas solenoide.

Na Figura 5.5 é apresentada a configuração final de montagem da unidade de comando do SBN.

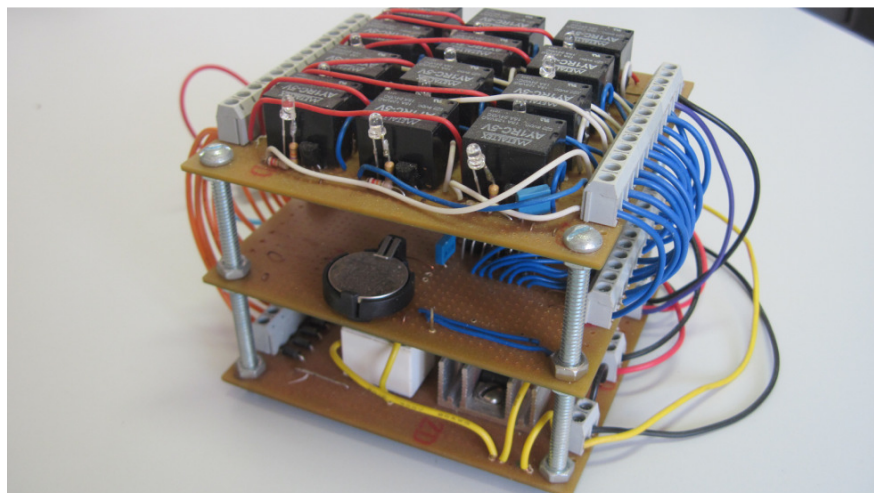


FIGURA 5.5 – Módulo de comando do SBN

O sensor de nível utilizado pelo equipamento foi construído tomando por base um transdutor da marca Freescale, modelo MPXV5050DP, com capacidade para a leitura de até 5 mca. O aparelho foi adaptado para uso direto em água por meio da utilização de um selo hídrico em silicone líquido de alta densidade. Detalhes sobre a construção e o desempenho deste sensor podem ser obtidos no Anexo 3 deste documento.

Uma pequena unidade de bombeamento foi construída por meio de duas pequenas bombas centrífugas do tipo utilizado em para-brisas de automóveis, ligadas em série para proporcionar a pressão e a vazão adequadas à coleta das amostras.

5.3 INSTALANDO O AMOSTRADOR SBN NA ESTAÇÃO TAMANDARÉ

A Figura 5.6 apresenta o conjunto de amostragem do SBN em sua primeira montagem operacional. O equipamento foi montado com 12 garrafas de coleta, sendo seis reservadas para amostragem na elevação de nível da seção e outras seis reservadas para a recessão, as quais foram acomodadas convenientemente dentro de um pequeno cesto plástico.

Um sistema de distribuição de amostras, composto por tubos de cobre, junções e válvulas solenoide, foi montado por sobre os frascos



Figura 5.6 – Conjunto de Coleta do Amostrado SBN

Na Figura 5.7 é apresentado o conjunto SBN em sua montagem operacional na estação Tamandaré, na Bacia do Rio Barigui. Pode ser observado o módulo de comando instalado por sobre o conjunto de coleta e a mangueira de conexão com a bomba de recalque, fixados à coluna de suporte foram instalados o sensor de nível do SBN e a unidade de bombeamento (Figura 5.8)



Figura 5.7 – SBN instalado na estação Tamandaré



Figura 5.8 – Montagem da unidade de bombeamento do SBN

Na Figura 5.8, acima, podem ser observados, além da unidade de bombeamento, os cabos do sensor de nível e de energia das bombas de recalque. A mangueira de recalque da unidade de bombeamento está plenamente visível. A segunda mangueira que pode ser observada pertence ao amostrador ISCO.

Diferentemente da tomada de sucção do amostrador ISCO, a tomada de bombeamento do SBN é única. Por este motivo, a unidade de bombeamento foi instalada de forma a fazer com que o ponto de coleta esteja situado na meia altura da unidade da tomada de sucção do ISCO (Figura 5.9)

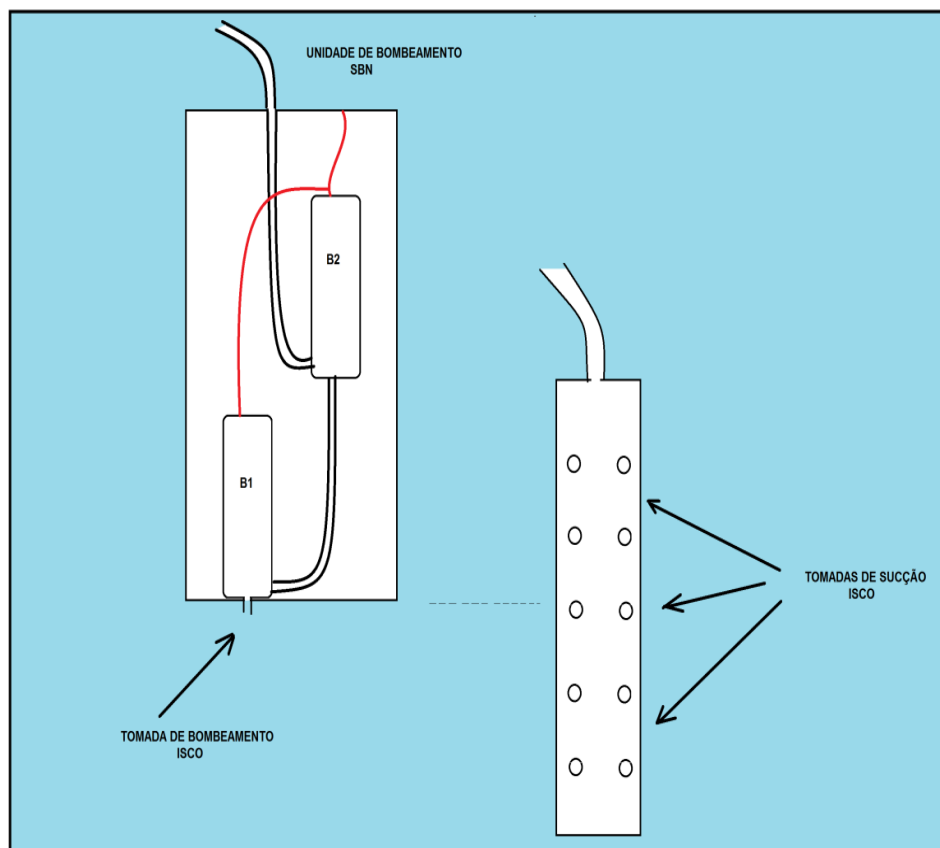


Figura 5.9 – Detalhe de Montagem da Unidade de Bombeamento

O sensor de nível do SBN foi interligado ao datalogger da estação hidrométrica para realizar o registro da informação por ele produzida. O objetivo principal foi o de permitir a comparação entre o processo de disparo de coletas dos amostradores inteligentes SBN e ISCO-LOGGER. Também foi interligada a porta de saída do SBN que indica que uma amostragem está em andamento à uma entrada do datalogger da estação hidrométrica. Assim, quando o SBN realiza uma coleta, o evento é registrado pelo datalogger.

Um benefício extra do registro das informações de nível produzidas pelo sensor do SBN consiste em comparar seu desempenho com o do sensor da estação hidrométrica. O interesse justifica-se pelo fato do custo do sensor do SBN não ultrapassar a barreira dos U\$ 20.00, enquanto o sensor da estação hidrométrica ter um preço médio de U\$1,000.00.

5.4 EXEMPLO DE RESULTADO DA AMOSTRAGEM COM O SBN

Entre novembro de 2012 e março de 2013, o amostrador SBN foi operado na estação TAMANDARÉ em paralelo com o conjunto amostrador LOGGER-ISCO, ambos realizando coletas de acordo com o princípio da amostragem inteligente.

As condições do programa do SBN foram ajustadas para que os amostradores pudessem realizar coletas de maneira idêntica, para que pudesse ser comprovada a capacidade de operação e a resistência do amostrador SBN.

Uma boa comparação operacional pode ser observada nas Figuras 5.10 a 5.12, referentes a um evento registrado no início de dezembro de 2012.

Na Figura 5.10, são apresentados os instantes em que foram deflagradas as coletas de amostras pelo SBN ao longo do evento. Ao todo foram coletadas 10 amostras que identificam perfeitamente a primeira fase do evento. Cabe destacar que, seis dessas amostras foram coletadas durante a elevação do nível, esgotando o número de garrafas de coleta do SBN que são reservadas para a elevação de nível. Quatro foram coletadas na primeira recessão, tendo sobrado duas garrafas reservadas para a recessão,

Na Figura 5.11 são apresentados os instantes em que foram realizadas as 17 coletas pelo processo de amostragem inteligente do conjunto ISCO-LOGGER. Como o limite do ISCO é maior (24 garrafas), o evento foi totalmente amostrado. A Figura 5.12 apresenta as duas amostragens num mesmo gráfico, para facilitar a comparação.

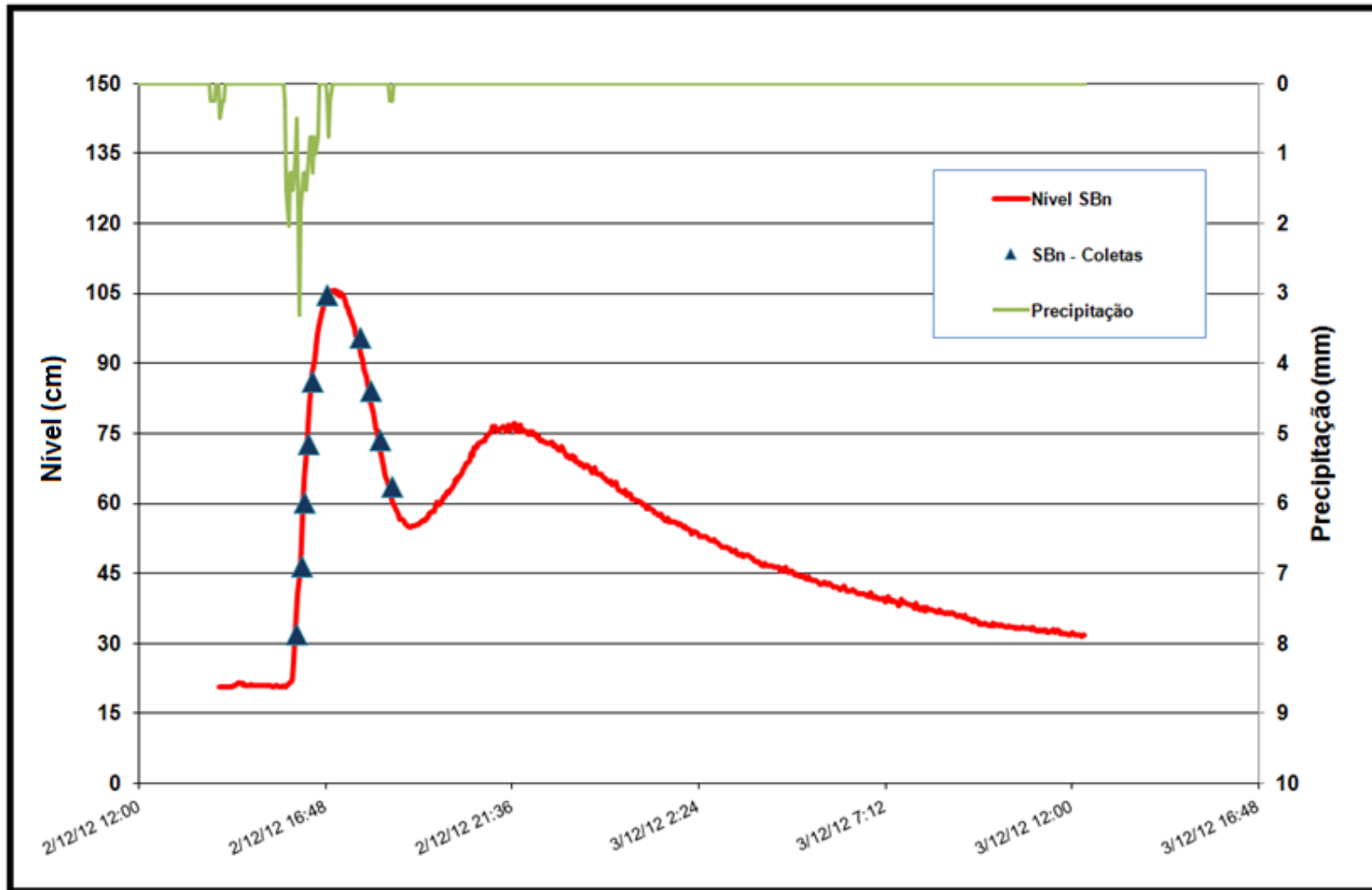


Figura 5.10 – Coletas Comandadas pelo Amostrador SBN

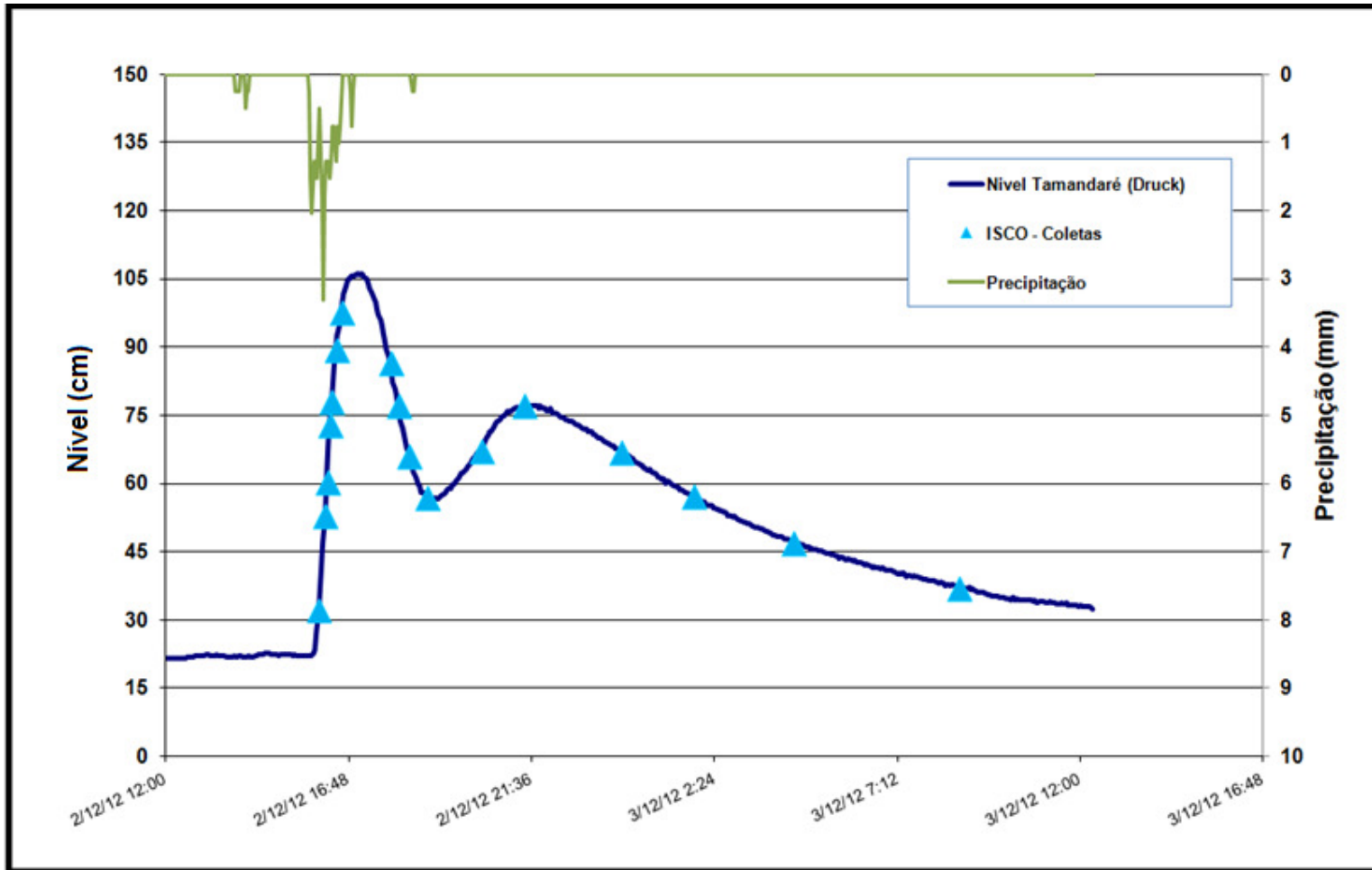


Figura 5.11 – Amostragem Inteligente e ISCO-LOGGER

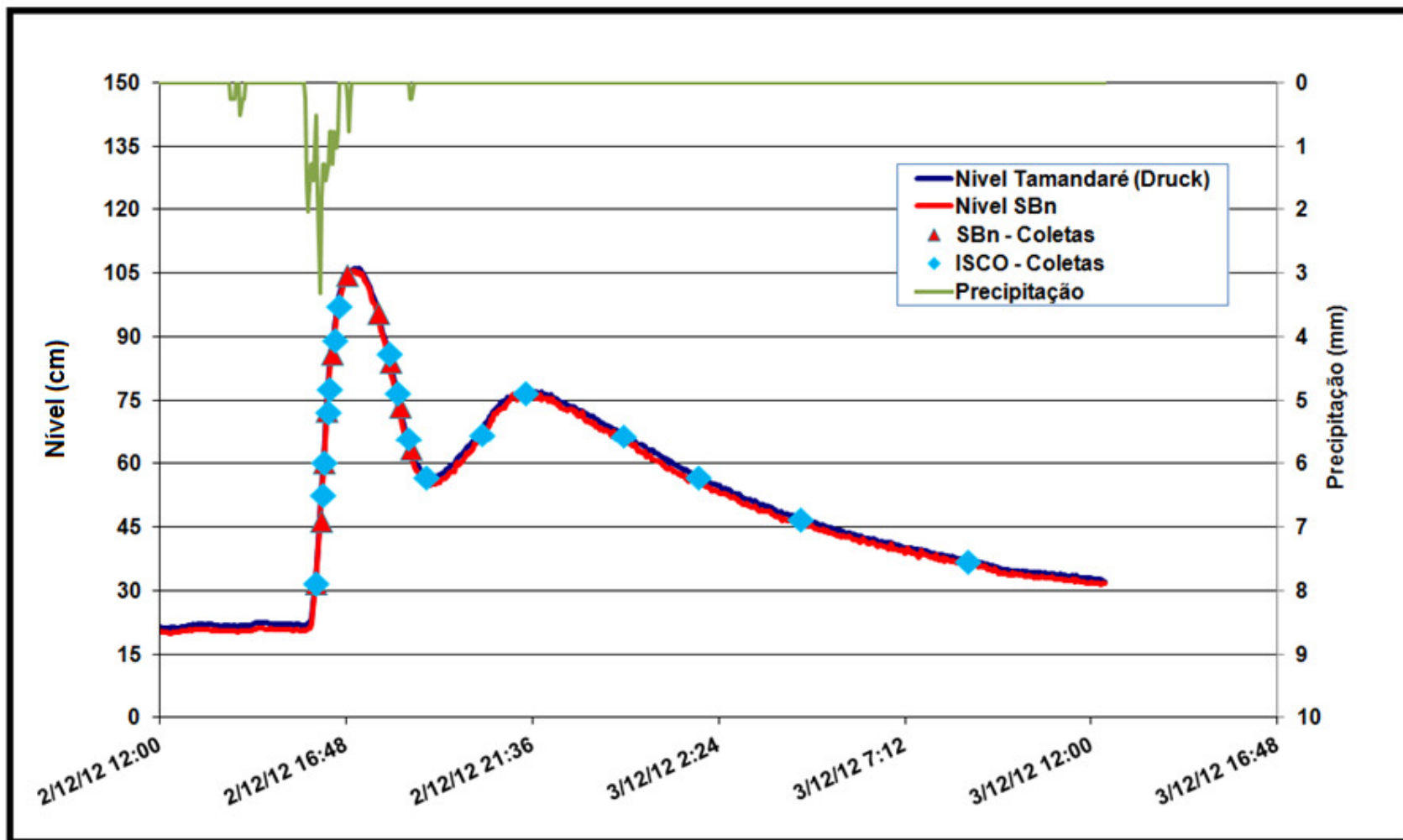


Figura 5.12 – SBN vs ISCO-LOGGER

O desempenho do amostrador SBN é demonstrado plenamente pela análise destas figuras. As amostragens são praticamente as mesmas. Pequenas diferenças notadas podem ser creditadas à velocidade da execução do programa do SBN, muito maior que a oferecida pelo conjunto ISCO-LOGGER. São destacados os seguintes e importantes pontos:

- Sensor de Nível do SBN:
 - O sensor e nível do SBN apresenta desempenho idêntico ao sensor de nível da própria estação hidrológica (DRUCK PTX1830), cujos dados são utilizados no processo de amostragem inteligente efetuado pelo conjunto ISCO-LOGGER;
 - O desempenho permite confirmar a viabilidade do uso desse sensor como componente importante e barato em equipamentos hidrológicos.
- O início da amostragem:
 - O conjunto ISCO-LOGGER iniciou a amostragem no nível 32,2 cm
 - O SBN iniciou a amostragem no nível 32,1 cm
- A sequência de amostragem na elevação:
 - O conjunto ISCO-LOGGER efetuou sete coletas razoavelmente distribuídas ao longo da elevação;
 - O SBN comandou a coleta de seis amostras bem distribuídas durante a elevação de nível
 - Tendo esgotado os frascos reservados para a elevação (seis frascos) o SBN, nesta versão mais simples, esgotou amostragem durante a elevação de nível;
- A sequência de amostragem na recessão - primeira fase:
 - O conjunto ISCO – LOGGER efetuou quatro coletas razoavelmente distribuídas na primeira fase da recessão;
 - O SBN comandou a coleta de quatro amostras bem distribuídas durante a primeira fase da recessão de nível;
- A segunda elevação de nível:
 - O conjunto ISCO – LOGGER efetuou duas coletas durante a segunda elevação de nível;
 - Como havia esgotado os frascos reservados para elevação de nível já na primeira fase de amostragem, o SBN não realizou coletas nesta parte do hidrograma;

- A segunda recessão:
 - O conjunto ISCO – LOGGER efetuou quatro coletas durante a segunda recessão;
 - Por um erro de programação, já corrigido, o SBN deixou de efetuar coletas durante a segunda recessão, embora tivesse dois frascos livres que ainda poderiam ter sido utilizados.
 - O erro envolveu a variável de controle que avisa o aparelho que os frascos estão cheios, sendo impossível a realização de novas coletas.
 - A variável foi acionada quando, na segunda elevação de nível, o aparelho bloqueou corretamente a coleta de uma sétima amostra durante a elevação de nível – bloqueio este que, inadvertidamente, foi estendido para a amostragem da recessão.

Resultados semelhantes foram obtidos em vários eventos ocorridos entre novembro de 2012 e março de 2013, enquanto o SBN e o amostrador inteligente composto pelo conjunto ISCO-LOGGER estiveram montados em paralelo na estação Tamandaré.

5.5 ANÁLISE CRÍTICA

O desenvolvimento de um amostrador automático alternativo, inteligente, microprocessado e de baixo custo não é trivial. O sucesso obtido pelo protótipo é relevante pelo fato de reproduzir exatamente a amostragem inteligente proposta neste trabalho com um investimento substancialmente mais baixo.

O SBN demonstrou ser capaz de executar adequadamente as rotinas propostas para a amostragem inteligente, efetuando a coleta de amostras exatamente como as que são realizadas pelo conjunto ISCO-LOGGER. Os resultados obtidos com o protótipo, mesmo considerando que este é limitado à coleta de apenas 12 frascos, permitem vislumbrar novas versões do aparelho, montadas com microprocessadores pertencentes à família 4 do MSP430, que possuem um número maior de portas de comunicação de entrada ou saída I/O (*Input/Output*), o que permitirá um número maior de frascos de coleta, uma vez que cada porta é utilizada para comandar a abertura e fechamento de um único frasco.

Com um número maior de I/Os também é tornada possível a implementação de funções ainda mais avançadas, como o descarte de amostras, a lavagem dos frascos, e o disparo de coletas pela leitura combinada de parâmetros hidrológicos e de qualidade de água, com o por exemplo, Nivel e Turbidez.

CAPÍTULO 6

A Validação da Amostragem Inteligente pela Comparação com Medidas de Turbidez

“There could be no fairer destiny for any physical theory than that it should point the way to a more comprehensive theory in which it lives on as a limiting case” - Albert Einsten

Neste estudo, o uso amostragem inteligente pode ser validado a partir da comparação de seus resultados com aqueles obtidos de uma outra forma. A comparação mais simples e direta é a comparação entre a amostragem inteligente e a amostragem temporizada, disponível nos amostradores automáticos ISCO.

Um segundo método de validação pode ser obtido se algum parâmetro de qualidade da água puder ser lido, automaticamente, em todas as ocasiões em que for registrado o nível do rio na seção. Se as leituras deste parâmetro forem confiáveis, o conjunto de seus dados quando associados às leituras do nível (e por consequência à vazão) podem representar uma excelente aproximação da verdadeira distribuição qualitativa do transporte de um determinado poluente em dada seção transversal.

No caso da estação Tamandaré, como a leitura de nível é feita a cada 150 segundos, a aproximação pode ser ao menos razoável se um bom sensor de qualidade da água for instalado na estação.

Os sensores eletrônicos para parâmetros de qualidade de água são notoriamente pouco confiáveis para estudos de longa duração. Dentre os parâmetros possíveis de serem monitorados adequadamente ao longo de um estudo com meses de duração, o de turbidez é o mais robusto e confiável.

Medidas óticas tendem a produzir resultados mais confiáveis se o sensor for de boa qualidade e se o aparelho puder realizar periodicamente a limpeza automática de suas superfícies ativas. Sensores com estas características estão disponíveis para Oxigênio Dissolvido e para Turbidez.

Como o objetivo final é comparar resultados de leituras automáticas com o resultado de análises laboratoriais, a comparação ficaria prejudicada no caso do Oxigênio Dissolvido porque a sua concentração pode variar nas garrafas de coletas, tanto para mais,

em virtude da agitação causada pelo bombeamento, quanto para menos, em virtude de reações químicas que não podem ser adequadamente inibidas pela refrigeração.

A turbidez, por outro lado, é um parâmetro conservativo, que pode ser analisado em qualquer tempo, não havendo necessidade de refrigeração das amostras coletadas.

Por este motivo, um sensor da marca FTS (Forest Technology Systems) do modelo DTS-12 (Figura 6.1) foi instalado na estação Tamandaré. Este aparelho foi escolhido por possuir superfícies ativas produzidas em safira, para resistir à abrasão causada pelo processo automático de limpeza, o que evita a deterioração das medidas ao longo do tempo.



Figura 6.1 - Sensor de Turbidez modelo DTS-12

O aparelho foi testado na seção, em condições normais de vazão, para que fossem estabelecidas as condições de uso, com foco especial na deterioração das leituras em função do acúmulo de limo por sobre as superfícies ativas. Foi observado que as leituras começam a ser afetadas após um período mínimo de 36h sem limpeza. Para a segurança do estudo, o aparelho foi programado para efetuar a autolimpeza em intervalos de duas horas.

Com a série de resultados obtidos, uma vez separado o escoamento superficial, foi possível calcular a concentração média dos eventos observados (EMCs), com um grande número de informações de vazão e turbidez instantâneas. Para efeitos deste estudo, o valor do EMC obtido por este processo representa a melhor estimativa da verdade sobre o comportamento da turbidez para cada evento analisado, e será referido como EMC_v.

Para cada evento analisado, o EMC_v pode ser comparado com os valores obtidos tanto pelo processo de amostragem inteligente real-analisada, calculado após a análise das amostras coletadas, quanto pelo processo da amostragem real-lida, calculado utilizando-se as leituras instantâneas do sensor de turbidez no momento em que o amostrador inteligente disparou as coletas das amostras.

Também é possível comparar o valor do EMC_v com os valores que poderiam ser obtidos pelo processo de amostragem temporizada, utilizando-se para tal os valores reais lidos para a turbidez nos instantes em que as amostras teriam sido feitas caso um amostrador temporizado fosse instalado na seção.

Neste último caso, é ainda possível obter valores para o EMC baseados em diferentes intervalos de tempo, de forma a se observar o impacto da escolha do intervalo sobre os valores obtidos.

Em resumo, é possível comparar os valores do EMC_v com os obtidos para o EMC tanto pela amostragem inteligente quanto pelas amostragens temporizadas com diversos intervalos de tempo.

6.1 O MÉTODO DE COMPARAÇÃO – EXEMPLO PARA UM EVENTO

Para demonstrar o método pelo qual a validação da amostragem inteligente foi efetuada, foi escolhido um evento ocorrido em 12/12/2012, o qual foi plenamente amostrado pelo conjunto ISCO-LOGGER.

O evento tem duração de 17 horas, ao longo das quais foram coletadas 24 amostras, sendo que 13 foram coletadas na fase de elevação da vazão enquanto as outras 11 foram coletadas na recessão (Figura 6.2). No mesmo intervalo de tempo foram registradas 408 leituras instantâneas de nível e de turbidez.

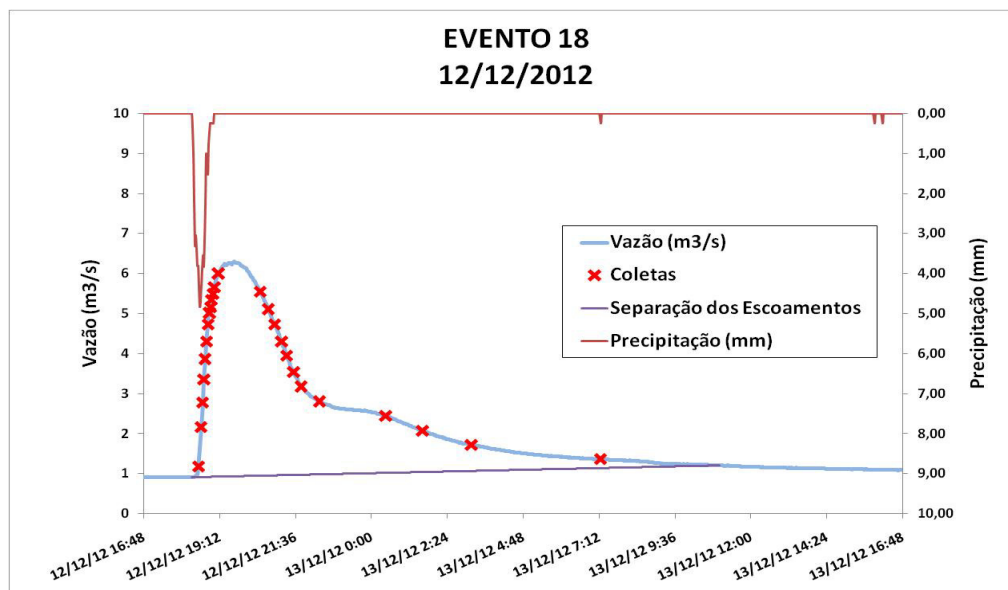


FIGURA 6.2 – Evento registrado em dez/2012

É importante mencionar que a leitura instantânea de nível é realizada após um tempo de aquecimento do sensor, o qual tem a duração de cerca de 250ms. No caso do sensor de turbidez, este intervalo de aquecimento é de cerca de 8s. Considerando, porém, que o nível na seção não varia bruscamente em um intervalo de tempo de 8 segundos, para efeitos deste estudo, uma leitura instantânea do nível e da turbidez é realizada em um intervalo de 8 segundos.

No caso da coleta de amostras pelos amostradores automáticos, o tempo de enchimento dos frascos, associado ao tempo de limpeza da mangueira, ultrapassa 1 minuto. Este intervalo maior faz com que possa haver alguma discrepância entre as leituras instantâneas da turbidez e os resultados da leitura das amostras coletadas, uma vez que o material coletado representa uma integração da turbidez ao longo do tempo de enchimento.

A informação de nível foi convertida em vazão pela Equação 3 (p. 64). A vazão do escoamento superficial foi separada do escoamento de base pelo método da linha reta para compor um conjunto de 408 pares de medidas automáticas (vazão do escoamento superficial e turbidez).

Estes valores foram utilizados para o cálculo do EMC para a turbidez resultando em 1.188 NTUs, que representa a melhor estimativa para a turbidez média do evento, pois foi obtida por meio de 408 medidas automáticas.

O EMC para a turbidez foi recalculado com base nos resultados das análises das 24 amostras coletadas, resultando em 1149,6 NTUs, um valor cerca de 3% inferior à melhor estimativa

Para efeitos de comparação o EMC para a Turbidez foi também recalculado com base nas leituras instantâneas da turbidez, registradas nos momentos em que as amostras 24 amostras foram coletadas, resultando o valor de 1129 NTUs, um valor apenas 1,7% inferior ao obtido pela análise das amostras coletadas nas garrafas.

Neste evento, a amostragem inteligente produziu, com apenas 24 garrafas de amostras, um resultado muito próximo à melhor estimativa para a média do parâmetro. Também ficou provado que com apenas 24 leituras do sensor automático de turbidez, realizadas nos instantes nos quais as amostras foram coletadas, é possível obter um resultado de igual qualidade.

Então, através do mesmo mecanismo, podem ser calculados os valores médios que seriam obtidos caso a amostragem tivesse sido realizada por meio de um processo temporizado. Para tanto, bastou buscar os valores da vazão e da turbidez para os instantes em que o processo de temporização deflagraria a coleta de amostras.

Não havendo, entretanto, uma referência pré-definida para o patamar de início da amostragem temporizada, foi adotado, para possibilitar a comparação e não agregar subjetividade da escolha de um patamar qualquer, o critério pelo qual a primeira amostragem temporizada se dá no exato momento no qual a primeira amostragem inteligente foi realizada.

Por este motivo, os resultados da comparação, apresentada no Quadro 6.1, precisam ser compreendidos dentro de suas limitações. Processos de amostragens temporizadas são deflagrados quando o nível da seção atinge um patamar fixo escolhido pelo operador, patamar este que é escolhido por meio de um estudo hidrológico que busca um valor que atenda, ao menos de maneira razoável, à maioria dos eventos. A amostragem inteligente não utiliza patamares fixos, iniciando a amostragem no momento mais adequado para cada evento individual.

Assim, os valores apresentados para os EMCs pelo método da amostragem temporizada são, provavelmente, superiores aos que seriam obtidos na realidade, pois decorrem de uma amostragem artificialmente iniciada no momento mais adequado para cada evento.

A comparação revela que a análise das amostras coletadas pelo processo inteligente produziram um resultado apenas 3% inferior ao valor calculado por meio das 408 leituras automáticas para a turbidez.

O valor difere do calculado utilizando 24 leituras automáticas do sensor (-5,4%) ao invés dos valores registrados nas garrafas. A diferença provavelmente é causada pela diferença dos tempos de leitura (8s) e da coleta de uma amostra (cerca de 1 minuto).

Quadro 6.1 – Resultados para a Turbidez

	EMC TURBIDEZ (NTU)	EMC TURBIDEZ (NTU)	DIFERENÇA (%)
	RESULTADO PARA 408 MEDIDAS AUTOMÁTICAS (Referência de Comparação)	1188	
AMOSTRAGEM INTELIGENTE	RESULTADO PARA 24 GARRAFAS ANALISADAS	1149	-3,2
	RESULTADO PARA 24 MEDIDAS AUTOMÁTICAS TOMADAS NOS MESMOS INSTANTES	1128	-5,4
AMOSTRAGEM TEMPORIZADA	RESULTADO PARA 16 MEDIDAS AUTOMÁTICAS TOMADAS EM INTEVALOS DE 1 HORA	1199	0,9
	RESULTADO PARA 9 MEDIDAS AUTOMÁTICAS TOMADAS EM INTEVALOS DE 2 HORAS	1029	-13,4
	RESULTADO PARA 6 MEDIDAS AUTOMÁTICAS TOMADAS EM INTEVALOS DE 3 HORAS	782	-34,2
	RESULTADO PARA 5 MEDIDAS AUTOMÁTICAS TOMADAS EM INTEVALOS DE 4 HORAS	329	-72,3

Conforme pode ser observado no caso deste evento, a amostragem temporizada com intervalos de hora produziria um resultado um pouco mais próximo do valor adotado como referência, desde que a primeira coleta fosse efetivamente realizada no momento adequado. É pois necessário verificar o desempenho dos diferentes processos de amostragem em outros eventos, o que é o assunto da próxima seção.

6.2 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE COMPARAÇÃO EM OUTROS EVENTOS

Nove eventos foram analisados pelo método comparativo aplicado na seção 6.1. Estes eventos foram selecionados para demonstrar a versatilidade da amostragem inteligente e suas limitações específicas.

Em especial, buscou-se eventos que diferem em duração, nos patamares iniciais de amostragem e no escoamento máximo, aqui representado pelo pico de nível da registrado durante o evento.

O patamar inicial de amostragem variou de 20,5 cm até 30,5 cm. Considerando que a primeira amostra é coletada quando uma variação de nível de mais de 5 cm em 10 minutos é detectada, podemos afirmar que os níveis da seção nos instantes que antecederam a primeira amostragem variaram de 15,5 cm a 25,5 cm. Ficou demonstrado que o aparelho consegue acompanhar a variação natural do nível do escoamento de base e se ajustar automaticamente para iniciar a amostragem de modo condizente com a necessidade.

A duração dos eventos e a altura do nível que representa do pico da vazão alteram-se consideravelmente. Temos eventos com 33 horas com pico de nível em 0,67m, eventos com 110 horas e pico em 1,18m e eventos com 9 horas com pico de 1,67m.

Ao serem analisados em conjunto os eventos apresentados no Quadro 6.2, utilizando-se o método demonstrado no item 6.1, torna-se evidente que, como a duração dos eventos varia bastante, a adoção de qualquer intervalo de tempo fixo para a coleta de amostras por meios temporizados resultaria em prejuízo para a avaliação dos valores para o EMC.

Evento	Começo Fim	Duração (h)	Nível Inicial (m)	Pico (m)	Amostras Coletadas	EMC para a Turbidez (NTU)					
						“Real”	Amost. Inteligente	Amost. Temporizada			
								1h	2h	3h	4h
16	10/11/2012 15:27 10/11/2012 18:37	3:10	0,305	0,627	5	430	438 +1,9%	381 -11,2%	260 -39,5%	101 -76,4%	Single Sample
17	2/12/2012 15:52 3/12/2012 15:17	23:25	0,228	1,061	17	684	642 - 6,1%	692 + 1,1%	670 - 2,1%	415 -39,4%	162 -66,7%
18	12/12/2012 18:17 13/12/2012 03:57	9:40	0,211	1,627	24	1188	1149 -3,2%	1199 + 0,9%	1029 -13,4%	782 -34,2%	329 -72,3%
20	27/12/2012 15:35 31/12/2012 09:00	89:25	0,217	0,698	11	194	188 -3,0%	137 -29,5%	144 -25,9%	204 + 5,3%	180 -7,3%
21	16/1/2013 13:00 18/1/2013 03:10	34:10	0,204	0,78	11	277	267 -3,5%	294 +6,1%	395 -18,6%	123 -55,7%	136 -50,7%
22	18/1/2013 17:25 20/1/2013 02:30	33:05	0,219	0,67	7	173	154 -11,3%	182 +5,2%	194 +11,9%	157 -9,6%	293 -13,6%
23	1/2/2013 19:00 2/2/2013 18:30	23:30	0,205	0,622	7	337	386 +14,3 %	349 +3,4%	246 -11,2%	123 -55,7%	136 -50,7%
24	17/2/2013 16:10 22/2/2013 06:00	109:45	0,246	1,182	23	179	183 +2,4%	278 +55,2%	211 +18,3%	197 +10,2%	149 -16.9%
25	26/2/2013 05:02 27/2/2013 07:12	26:10	0.299	1.009	16	160	158 -1,1%	157 -1.5%	150 -6.4%	173 +8.5%	132 -17.5%

Quadro 6.2 – Amostragem Inteligente vs Amostragem temporizada

A amostragem inteligente demonstrou versatilidade para obter bom resultados para o EMC em eventos completamente dispares. No evento 18, analisado em detalhes na seção 6.1, cuja duração é de cerca de 10h e que alcança um nível máximo de 1,63m, a diferença entre o EMC calculado e o obtido das amostras é de cerca de 3%, coletadas 24 amostras. No evento 24, com duração de cerca de 110h e cujo nível máximo atinge 1,18m o aparelho coletou 23 amostras que produziram uma diferença ainda menor – 2,5%. Para efeitos de comparação, os hidrogramas destes eventos estão apresentados abaixo (Figura 6.3)

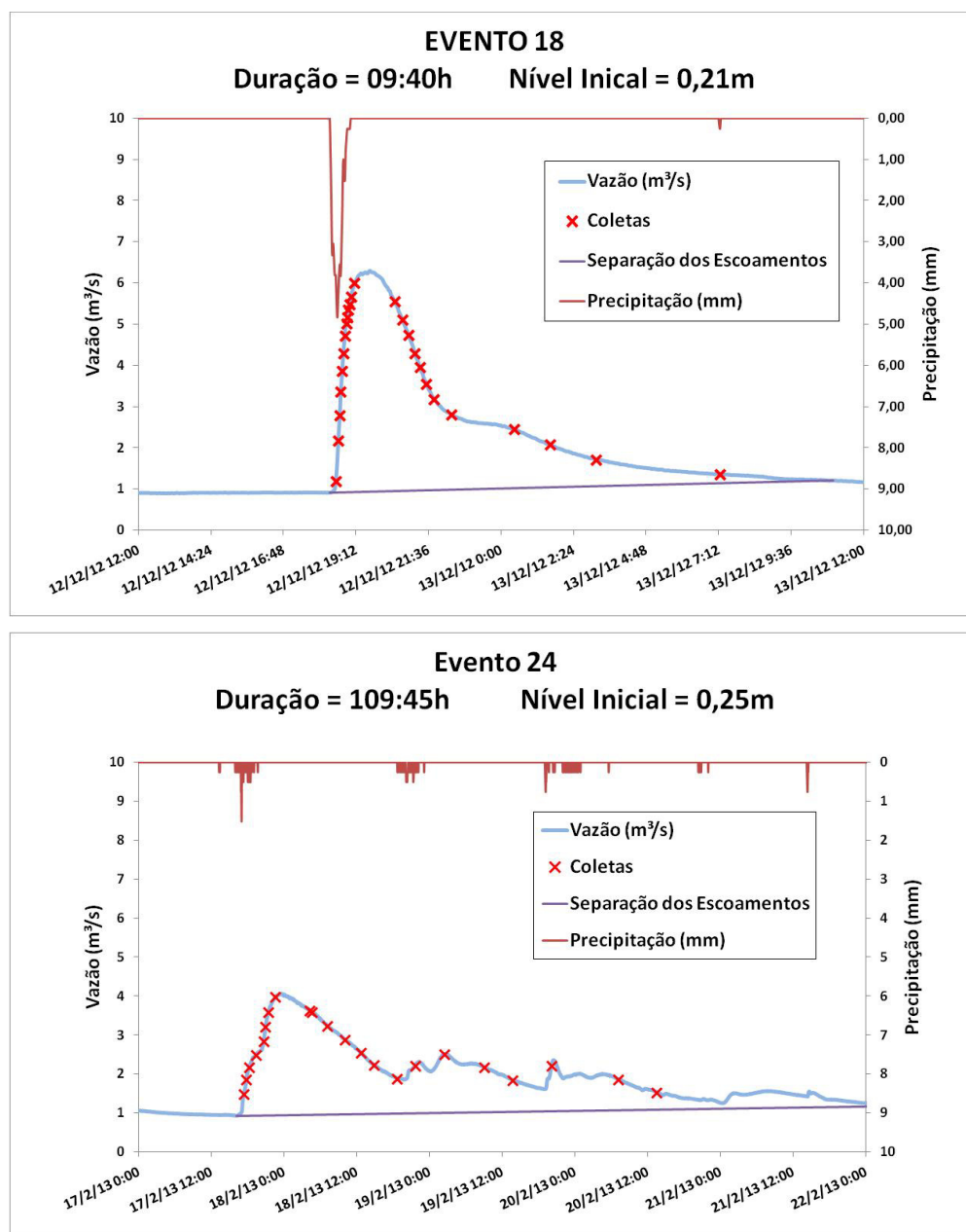


Figura 6.3 – Comparação entre eventos

A disparidade entre estes eventos e o bom resultado da amostragem inteligente em ambos casos demonstra a superioridade da amostragem inteligente sobre o esquema temporizado.

Dos 9 eventos analisados, em seis ocasiões as diferenças entre os valores da melhor estimativa para o EMC da Turbidez ficou entre 1 e 3,5%, em uma ocasião na faixa dos 6% e em duas ocasiões entre 10 e 14%.

Nestes últimos casos, o número total de amostras coletadas durante o evento foi relativamente menor que nos casos de maior sucesso, ficando em 7 amostras. Uma análise mais detalhada de um dos eventos oferece uma explicação para a diminuição da precisão – a inversão de tendência do escoamento, nos picos e vales dos hidrogramas pode propiciar intervalos sem cobertura de coletas de amostras, como pode ser observado na Figura 6.4, referente ao Evento 22

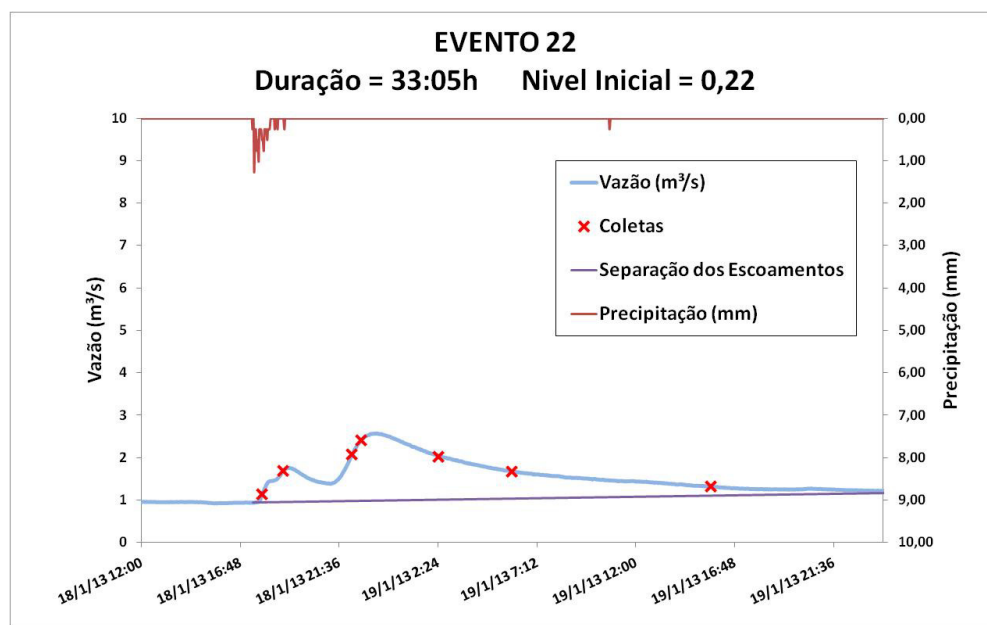


Figura 6.4 – Hidrograma do Evento 22

A inversão da curva da vazão antes mesmo do pico do hidrograma pode inserir erros na amostragem, pois permite a ocorrência de um intervalo descoberto, sem amostragens. A mesma coisa ocorre no pico propriamente dito, que não é especificamente coberto por uma amostragem próxima.

6.3 A VALIDAÇÃO PELA AMOSTRAGEM PARALELA

Uma boa maneira de efetuar a validação do método de amostragem inteligente é a comparação direta de amostragens reais realizadas por dois amostradores diferentes.

Com a entrada em operação da primeira versão do SBN e a comprovação de que o aparelho é capaz de realizar a amostragem inteligente, foi possível reverter o amostrador ISCO para utilização como amostrador automático convencional, operado por meio da temporização disponível no próprio software do equipamento.

A amostragem temporizada, realizada por amostradores automáticos ISCO ou assemelhados de outras marcas, é um processo simples e bastante utilizado para a coleta de amostras em eventos de cheia (Yang e Wang, 2010).

A maneira mais simples de comandar o equipamento consiste em acoplar uma boia dotada de contato elétrico, semelhante às utilizadas para acionamento de bombas em cisternas. Sua instalação inibe a coleta de amostras até que um patamar de nível mínimo seja alcançado na seção.

O software do equipamento permite programação de intervalos fixos que podem variar de alguns minutos a várias horas, ou mesmo dias. Ao receber o sinal de ativação emitido pela boia, o equipamento começa a executar o programa de amostragem temporizada realizando uma coleta em cada vez que o intervalo predefinido pelo operador houver transcorrido. Nesta pesquisa, como já foi mencionado, o número de amostras individuais é limitado a 24 frascos, que são utilizados consecutivamente até o limite do equipamento.

A utilização de boias elétricas, entretanto, podem inserir incertezas na operação do amostrador. A exposição do equipamento às condições do rio podem produzir alterações na regulação no nível de ativação, prejudicando a amostragem.

Para evitar o descompasso entre as amostragens automáticas temporizada (realizada pelo ISCO) e a inteligente (realizada pelo amostrador SBN), é necessário garantir que ambas sejam iniciadas no mesmo momento. Por isso, o uso de uma boia elétrica foi descartado, sendo, pois, substituída pelo Datalogger.

O programa do aparelho foi modificado para enviar um sinal habilitador ao amostrador, simulando o efeito de uma boia elétrica. O Logger aciona um relé que transmite um sinal de contato aberto ao ISCO, ativando o programa do equipamento. O sinal permanece ativo enquanto o nível do rio permanecer acima do patamar registrado no início da amostragem.

A rotina de detecção de variação de nível, característica da amostragem inteligente, foi preservada no datalogger para garantir que as amostragens temporizada e inteligente se iniciassem no mesmo tempo. Cabe destacar que, certamente, a amostragem temporizada

assume assim uma característica não real, posto que uma boia elétrica somente pode ser regulada para um patamar fixo de operação. Por isso, a comparação entre os resultados das amostragens deve ser considerada em sua real dimensão, ou seja, entre um processo inteligente e a melhor amostragem temporizada possível, a qual somente seria obtida se a regulação do nível fixo da boia elétrica fosse perfeitamente adequada a cada um dos eventos – situação pouco provável em experimentos reais, mas mantida para eliminar o componente subjetivo que a escolha de um patamar fixo introduziria no estudo.

Na Figura 6.5, pode ser observada a entrada “F”, marcada com o texto “inhibit in”. Um relé comandado pelo datalogger, mantém a entrada no nível lógico zero (0 Volts), interrompendo a execução do programa de amostragem temporizada do amostrador ISCO. O sinal somente é retirado, liberando a coleta automática temporizada de amostras quando um evento de cheia é detectado.

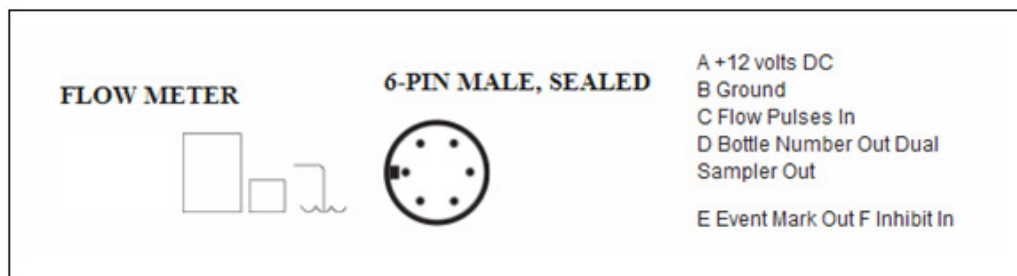


Figura 6.5 – Detalhe da entrada do amostrador ISCO.

Existem, entretanto, algumas limitações a mais na comparação entre os processos de amostragem inteligente (via SBN) e temporizada (via ISCO-LOGGER). Como protótipo do amostrador SBN em testes possui apenas 12 frascos de coleta, dos quais seis são reservados para a subida de nível e seis para a recessão, a comparação justa entre as amostragens depende da ocorrência de um evento que possa ser bem amostrado dentro destas limitações.

Dentre os eventos ocorridos entre fevereiro e março de 2013, apenas um atende, de maneira parcial, os requisitos que permitem a comparação. Outros eventos foram intensos demais para serem amostrados com apenas 12 frascos do SBN ou, ainda, foram sub-amostrados pela exaustão das baterias do ISCO, cuja autonomia não é muito grande.

Nas Figuras 6.6 e 6.7 é apresentado o evento ocorrido em 13 de março de 2013, detalhando separadamente as amostras coletadas pelo amostrador inteligente SBN e pelo amostrador temporizado ISCO. É importante observar que, embora exista a opção “amostragem imediata” no menu de configuração do amostrador ISCO, a adoção desta opção não resultou na coleta de uma amostra imediatamente após detecção do início de um

evento de cheia. O amostrador ISCO, programado para realizar uma coleta a cada hora, insistiu em contar uma hora inteira antes de realizar a primeira coleta, contrariando o indicado no manual.

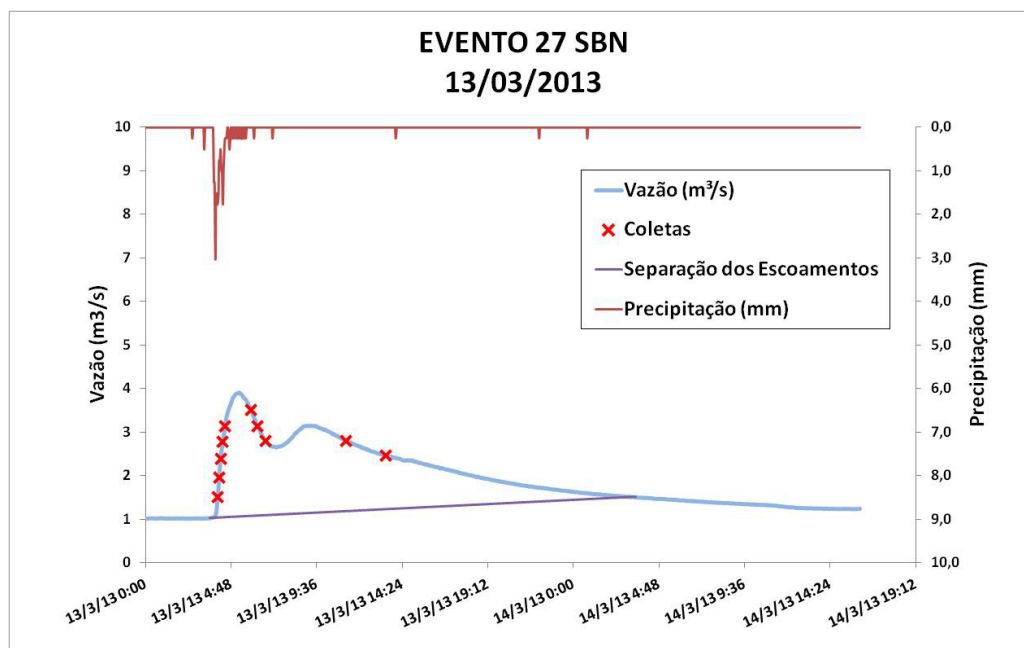


Figura 6.6 – Coletas realizadas pelo SBN (amostragem inteligente)

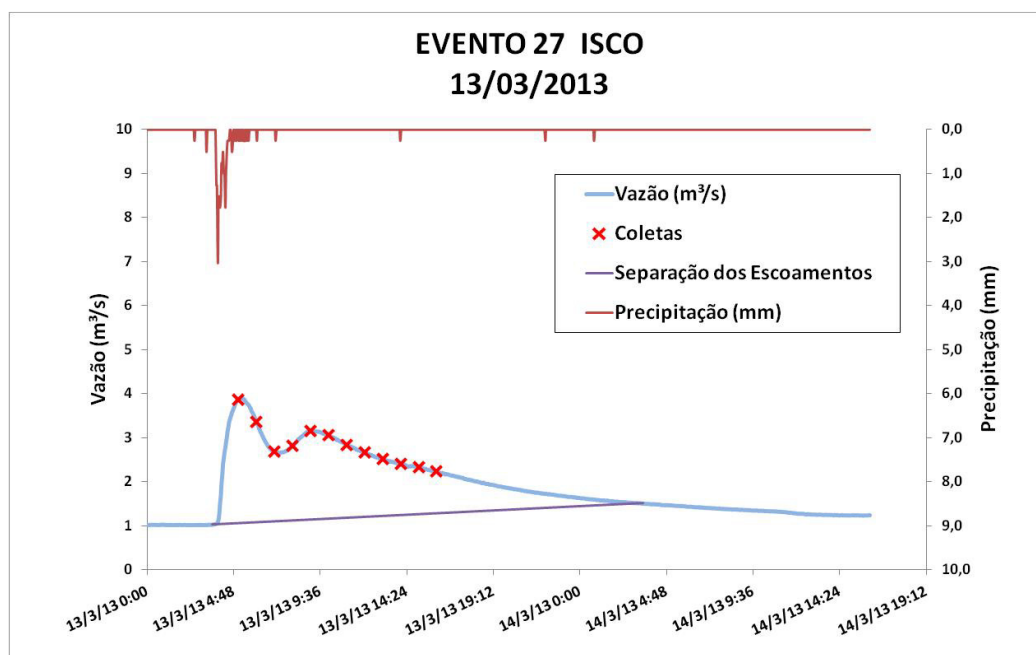


Figura 6.7 – Coletas Realizadas pelo ISCO (amostragem temporizada)

Pode-se notar imediatamente a falta de amostragens no início do evento para a amostragem temporizada, realizada pelo ISCO. O aparelho realizou 12 coletas, concentradas ao longo da recessão do hidrograma, antes de interromper as coletas pela exaustão de suas baterias.

O SBN realizou 10 coletas cinco concentradas na elevação inicial do hidrograma e cinco distribuídas ao longo da recessão. Dois outros frascos (um reservado para subida e outro reservado para descida) foram utilizados anteriormente quando de pequena elevação de nível ocorrida as 19h do dia 10 de março, 31h antes do início do evento (Figura 6.8).

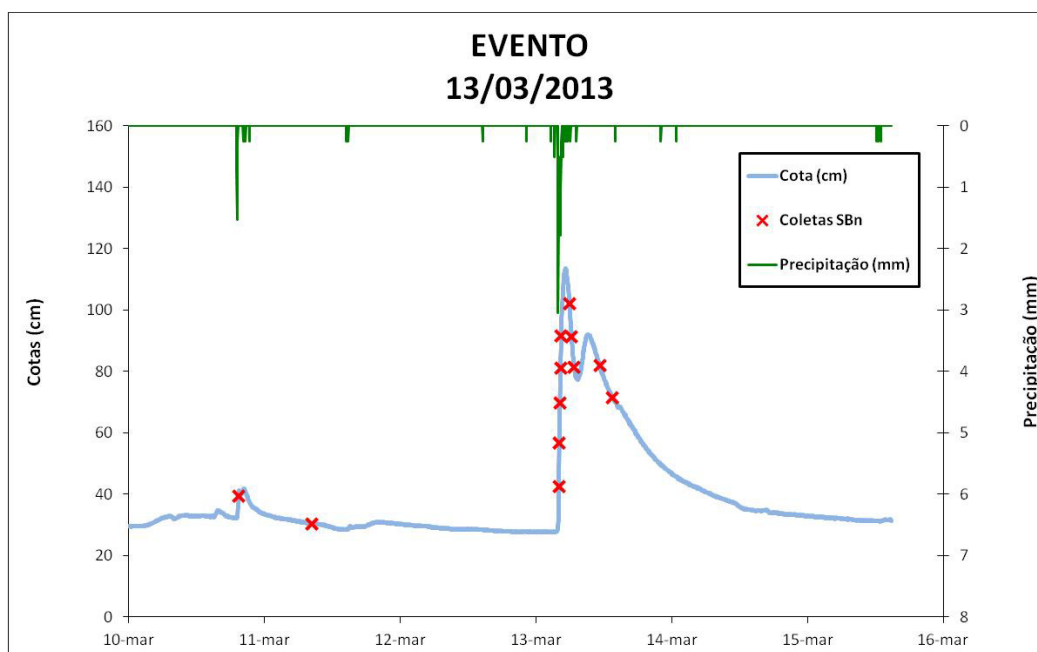


Figura 6.8 – Detalhe das amostras coletadas pelo Amostrador SBN

Algumas considerações precisam ser colocadas sobre o desempenho do amostrador SBN neste evento:

- O aparelho detectou automaticamente e de maneira adequada o início de dois eventos, sendo que o primeiro não teve sequência;
- O nível prévio ao primeiro evento era de cerca de 32,5 cm enquanto o nível prévio ao segundo evento era de 27,8 cm;
- No primeiro evento, como a variação de nível foi um pouco menos intensa, a primeira amostra foi coletada no nível 39,3cm, um valor 6,8 cm acima do valor do nível anterior ao evento (32,5 cm);
- No segundo evento, como a variação do nível da seção se deu de maneira mais rápida, a primeira amostra foi coletada no nível 42,5cm, cerca de 15 cm acima do valor que precedeu o início do evento (27,8cm), demonstrando a versatilidade do aparelho;

e) A importância do mecanismo de descarte, a ser implantado na nova versão do amostrador SBN, fica bem demonstrada. Se tivessem sido descartadas as primeiras duas amostras, os dois frascos liberados teriam sido utilizados na amostragem do evento principal;

No que concerne ao desempenho do amostrador ISCO configurado para coletar amostras temporizadas, cabe destacar:

a) Embora dotado de um número maior de frascos, o amostrador ISCO exauriu suas baterias antes do final do evento.

b) A durabilidade das baterias do ISCO é de cerca de uma semana em “stand by” ou 24 frascos coletados. É importante ressaltar que quanto mais tempo o aparelho permanecer em espera, menor será o número de frascos que o aparelho conseguirá preencher antes de exaurir suas baterias;

c) O evento principal ocorreu 5 dias após a visita de manutenção, na qual a bateria foi trocada. No transcorrer destes cinco dias a bateria reduziu sua carga ao ponto de somente conseguir atender a coleta das 12 amostras coletadas;

d) Durante a primeira hora, sem haver nenhuma coleta pelo amostrador ISCO temporizado, ocorreu toda a elevação de nível.

Os dois equipamentos interromperam a amostragem sem registrar adequadamente o trecho final do evento. O protótipo SBN por ter completado o número de frascos e o ISCO pela exaustão das suas baterias.

Como consta em manual a possibilidade de se ajustar o ISCO para realizar uma primeira coleta de amostra imediatamente após a habilitação do programa de temporização, considerando que o aparelho disponível não realiza a função prevista (sendo provável causa um defeito em seu software) e que o amostrador SBN realiza sua primeira coleta exatamente no momento em que o ISCO deveria realizar a sua, para não prejudicar a comparação, os resultados das análises feitas na primeira amostra do SBN foram usados para substituir os resultados da amostra inicial faltante no ISCO.

Os valores de EMC para a turbidez foram comparados (Quadro 6.3) com o valor obtido por meio de 570 valores lidos pelo sensor de turbidez durante o evento.

Quadro 6.3 – Comparação Medidas de Turbidez

EVENTO 13/03/2013 EMC para TURBIDEZ					
SBN Amostragem Inteligente		ISCO Amostragem Temporizada		SENSOR AUTOMÁTICO (570 Leituras)	
144 NTUs		93 NTUs		187 NTUs	
Diferença (%)	-23 %	Diferença (%)	- 51 %	-	-

Os valores do EMC para a turbidez, calculados a partir das amostras coletadas pelos dois processos, resultaram subestimados. No caso da amostragem temporizada, a diferença pode ser creditada à ausência de amostras coletadas durante a principal elevação de nível da seção.

Como o amostrador SBN, que realiza amostragem inteligente, conseguiu coletar amostras durante a ascensão principal do nível da seção, o valor obtido para a EMC aproximou-se mais do valor obtido por meio das leituras do sensor automático, usado como referência. Entretanto, a coleta foi prejudicada pelo pequeno número de frascos da versão protótipo do SBN, e pela perda de dois frascos utilizados no pequeno evento prévio.

Se o mecanismo automático de descarte de amostras já estivesse operando, os dois frascos teriam sido esvaziados automaticamente e estariam disponíveis para coletar amostras no evento principal. Desta forma, duas amostras extras teriam sido coletadas, uma durante a principal elevação de nível, e outra na recessão, as quais provavelmente teriam contribuído para a melhora na estimativa do valor da EMC para a turbidez.

6.4 ANÁLISE CRÍTICA

A amostragem inteligente provou ser versátil o suficiente para produzir resultados conduzem à melhor avaliação da concentração média do evento (EMC) para a Turbidez.

Quando confrontados os resultados da amostragem inteligente com os produzidos por um grande número de leituras automáticas de Turbidez, a diferença é pequena o suficiente para que se considerem como sendo o produto das diferenças existentes entre os aparelhos de leitura.

Embora a amostragem temporizada possa produzir resultados razoáveis, não é possível afirmar que esses resultados possam estar dentro de uma pequena faixa de erro. Para quaisquer dos intervalos testados (1,2, 3 e 4h) existem situações nas quais a

estimativa da EMC para turbidez se desvia consideravelmente do valor correto. Foram encontrados erros de 55% para intervalos de uma hora, de 40% para intervalos de duas horas, de 70% para intervalos de três horas e de 67% para intervalos de quatro horas.

Ao contrário do esperado, pois o estudo hidrológico apontava para duas horas como sendo o intervalo de tempo mais adequado para as amostragens temporizadas nesta seção – com este intervalo as 24 garrafas do amostrador seriam suficientes para cobrir eventos com duração média de 48h – as diferenças menores foram observadas para amostragens temporizadas em intervalos de uma hora.

No caso da amostragem inteligente, o desvio máximo foi de 16% em um evento no qual foram coletadas apenas 7 amostras, com inversões da curva do hidrograma semelhantes às do Evento 9.

Uma das vantagens da amostragem inteligente consiste no fato de que ela pode ser aprimorada para responder às demandas da estação. No caso da estação Tamandaré, é possível que a amostragem pudesse ser beneficiada pela inclusão de uma rotina de detecção de inversão de tendência da curva do hidrograma. O programa poderia comandar uma amostragem a ser realizada exatamente nestas situações, evitando assim o aparecimento de intervalos sem cobertura de amostragem.

Esta modificação, porém, somente será possível quando a nova versão do amostrador SBN, com maior capacidade de frascos de coleta, estiver disponível para testes. Não estando limitados aos 24 frascos do ISCO, pequena será a chance de se prejudicar a amostragem de eventos de grande magnitude e duração, a qual seria comprometida se uma nova amostragem fosse coletada em todas as vezes nas quais for detectada uma inversão na tendência dos hidrogramas do evento.

A versão atual do SBN, com apenas 12 frascos de coleta, é um protótipo que impõe limitações à coleta de amostras.

Apesar disso, foi possível observar, no evento descrito, a superioridade do sistema de amostragem inteligente sobre o processo de amostragem temporizada, pois as amostras coletadas pelo SBN resultaram ser mais representativas do evento que as coletadas pelo ISCO temporizado.

As amostragens temporizadas foram obtidas com intervalos de 60 minutos, que seriam mais adequadas para eventos de curta duração, como o que ocorreu. Eventos de longa duração seriam gravemente sub amostrados nesta configuração.

Mesmo considerando que a configuração utilizada era adequada para eventos de curta duração, a principal elevação de nível do evento foi perdida pelo esquema temporizado. Nenhuma amostra foi coletada durante a ascensão do nível, que ocorreu em pouco menos de 60 minutos.

O evento demonstra com exatidão a vantagem da amostragem inteligente, uma vez que o SBN produziu um conjunto melhor de amostras, mesmo considerando que existiam apenas 10 frascos disponíveis para coletas no início do evento.

CAPÍTULO 7

Resultados

“There is no substitute for hard work” – Thomas A. Edison

Nesta pesquisa, ao longo de 15 meses, desde o início de 2012 até março de 2013, vinte e sete eventos ocorreram na seção de controle. No período de janeiro a outubro de 2012, período no qual a amostragem inteligente foi realizada exclusivamente pelo esquema ISCO - LOGGER, dezesseis eventos foram registrados na estação Tamandaré.

Como o *datalogger* foi programado para registrar os instantes nos quais são comandadas coletas de amostras, é possível saber o número de amostragens comandadas pelo aparelho em comparação com as coletas efetuadas pelo amostrador ISCO. Nos cinco primeiros eventos é possível observar o resultado dos esforços para o aprendizado das limitações do equipamento, especialmente no que tange a autonomia das baterias do ISCO.

Os eventos de 4 a 24 foram coletados adequadamente pelo amostrador inteligente ISCO – LOGGER, com exceções feitas aos eventos 7 e 14 – como consequência das limitações da bateria do ISCO, e do evento 15 – que excedeu a capacidade máxima de amostras passíveis de serem coletadas pelo ISCO.

O mês de Novembro foi dedicado à instalação e testes do amostrador automático inteligente SBN e do sensor automático de Turbidez na estação Tamandaré. Os eventos 16 a 23 foram registrados pelos amostradores inteligentes ISCO-LOGGER e SBN, ajustados com os mesmos padrões de operação, ou seja, ambos operando em paralelo. Este período consiste ser o mais importante do estudo, uma vez que os resultados da amostragem podem ser comparados com as leituras automáticas para a turbidez.

Todos os eventos foram registrados adequadamente pelo amostrador ISCO-LOGGER, sem exceção, ressaltando-se apenas o evento 18, no qual foram comandadas 25 coletas e realizadas apenas as 24 amostras individuais possíveis no ISCO. Após pequenos ajustes realizados no SBN, este passou a amostrar adequadamente os eventos, tendo obtido sucesso em 7 dos 11 eventos.

O final de fevereiro de 2013 foi utilizado na reprogramação do amostrador ISCO-LOGGER, para torná-lo um amostrador temporizado. O datalogger da estação foi utilizado

para emitir um sinal semelhante aquele de uma boia de nível, liberando a execução do programa de coleta de amostras temporizadas do ISCO.

Em março de 2013, três eventos foram registrados na estação Tamandaré, os quais foram adequadamente amostrados pelo amostrador inteligente SBN. Destes eventos, ressalta-se o evento 27 o qual foi também registrado pelo amostrador temporizado ISCO

7.1 ROTEIRO DA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os experimentos podem ser divididos em três fases: (i) **1ª Fase:** de janeiro a novembro de 2012 as coletas foram realizadas exclusivamente pelo conjunto amostrador inteligente composto pelo amostrador ISCO e o Datalogger da estação Tamandaré (ISCO-LOGGER); (ii) **2ª Fase:** Em novembro de 2012 entrou em funcionamento o amostrador inteligente SBN, operando em paralelo com o amostrador ISCO-LOGGER. Um sensor automático de turbidez foi instalado na estação para oferecer base de comparação entre as leituras e a amostragem realizada pelos dois aparelhos. O SBN foi ajustado com os mesmos parâmetros de operação utilizados no ISCO – LOGGER. Durante seu primeiro mês em operação, alguns pequenos ajustes foram necessários ao SBN para corrigir falhas mecânicas e na programação. Os aparelhos operaram em paralelo até que ficasse comprovada a capacidade do SBN de espelhar as amostragens inteligentes produzidas pelo ISCO-Logger; (iii) **3ª Fase:** o conjunto ISCO-Logger foi reprogramado para executar amostragens temporizadas, permanecendo o SBN responsável pela coleta de amostras pelo método da amostragem inteligente.

No Quadro 7.1, são apresentadas e sintetizadas as configurações de amostragem para cada fase, na qual também pode ser observada a quantidade de eventos amostrados em cada fase.

Quadro 7.1 - Resumo das configurações dos amostradores

Fase	Amostragem Inteligente ISCO LOGGER	Simulação Amostragem Temporizada	Sensor de Turbidez	Amostragem Inteligente SBN	Amostragem Temporizada ISCO	Nº de Eventos
1ª Fase 30/12/2012 a 10/11/2012	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	16
2ª Fase 02/12/2012 a 01/03/2013	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	8
3ª Fase 04/03/2013 a 31/03/2013	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	3

7.2 RESULTADOS DA 1ª FASE DO ESTUDO – AMOSTRAGEM INTELIGENTE VIA ISCO-LOGGER

Esta primeira fase do estudo compreende o período entre dezembro de 2011 e novembro de 2012, que inclui estudos com base no amostrador inteligente composto pelo conjunto ISCO – LOGGER, que foi operado de forma individual na estação Tamandaré. Durante este tempo, o programa instalado no datalogger para proceder a amostragem inteligente foi sendo aprimorado, tanto para melhorar o processo de coleta inteligente de amostras durante eventos de cheia quanto para oferecer subsídios à construção do amostrador inteligente SBN.

Nos Quadros 7.2 e 7.3, são apresentados os 16 eventos registrados pelo ISCO – LOGGER no período. Em alguns eventos a amostragem foi interrompida ou mesmo não foi realizada em função de problemas de autonomia do ISCO. A autonomia das baterias do ISCO é limitada a 7 dias em modo de espera ou pela coleta de 24 frascos individuais com volume de um litro. Nos casos em que os eventos se iniciam após 4 ou 5 dias transcorridos em modo espera, a energia remanescente na bateria pode não ter sido suficiente para completar a coleta de 24 frascos, motivo pelo qual alguns eventos não foram completamente amostrados.

É importante ressaltar que mesmo nos casos em que o ISCO tinha se autodesligado em função da exaustão de suas baterias, o LOGGER continua enviando comandos para a realização de coletas ao ISCO. Consequentemente, todos os instantes nos quais o programa executado no LOGGER acionou uma nova coleta foram registrados, mesmo nos casos em que o ISCO não as realizou.

A coleção de instantes de coleta é útil para avaliar o processo de amostragem inteligente. Os dezesseis eventos registrados, amostrados ou não, compõem uma base de dados importante sobre o desempenho do processo de amostragem inteligente aplicado a eventos de cheia. Dos eventos amostrados, oito tiveram suas amostras analisadas em laboratório. Para estes casos, valores das concentrações médias do evento para os parâmetros analisados são apresentados em tabelas.

Como não havia ainda um sensor de turbidez instalado na estação, tampouco um segundo amostrador, não existem parâmetros de comparação que permitam comprovar que a amostragem inteligente é mais eficaz que a temporizada neste estágio.

Entretanto, indícios do bom desempenho da amostragem inteligente podem ser auferidos pela observação da boa distribuição dos instantes de coletas ao longo dos eventos.

Quadro 7.2 – Eventos Coletados Exclusivamente pelo Esquema ISCO – LOGGER para Amostragem Inteligente.

Evento No	ISCO FUNCIONANDO COM AMOSTRAGEM INTELIGENTE									
	Início	Duração (h)	Amostras Comandadas		Comentário	início (m)	Amostras Analisadas		DQO	Metais
	Fim		Amostras Coletadas			Pico	Sólidos	Turbidez	TOC	
1	30/12/2011	77	16		Falha no Software	0,3	0			
	01/01/2012		0			1,1				
2	15/01/2012	21	7		Falha Bateria Isco	0,47	5		✓	
	15/01/2012		5			1,1	✓		✓	
3	16/01/2012	150	15		comportamento estranho da seção	0,36	14		✓	
	24/01/2012		14			0,68	✓		✓	
4	10/02/2012	36	17			0,3	17		✓	
	12/02/2012		17			1,1	✓	✓	✓	
5	14/02/2012	3	2		evento sem sequência	0,38	0		✓	
	14/02/2012		2			0,33	✓		✓	
6	20/02/2012	105	19		Baixa variação de Nivel	0,31	19		✓	
	25/02/2012		19			0,76	✓		✓	
7	27/02/2012	32	4		Falha Bateria Isco	0,34	0			
	28/02/2012		3			0,37				
8	27/03/2012	37	16			0,3	0			
	28/03/2012		16			1,07				
9	26/04/2012	49	24			0,47	19		✓	
	28/04/2012		24			1,1	✓		✓	
10	10/06/2012	43	16			0,75	0			
	12/06/2012		16			1,51				

Quadro 7.3 – Eventos Coletados Exclusivamente pelo Esquema ISCO – LOGGER para Amostragem Inteligente.

Evento No	ISCO FUNCIONANDO COM AMOSTRAGEM INTELIGENTE								
	Início	Duração	Amostras Comandadas	Comentário	início	Amostras Analisadas		DQO	Metais
	Fim		Amostras Coletadas		Pico	Sólidos	Turbidez	TOC	
11	06/07/2012	41	5		0,41	0			
	08/07/2012		5		0,66				
12	11/07/2012	34	9		0,46	0			
	13/07/2012		9		0,92				
13	17/07/2012		1		0,6	0			
	19/07/2012		1						
14	21/09/2012	27	9	Falha Bateria Isco	0,3	0			
	22/09/2012		4		0,75				
15	20/10/2012	94	27	Estouro de Capacidade do Isco	0,28	0			
	24/10/2012		24		1,24				
16	10/11/2012	3	5		0,31	0			
	10/11/2012		5		0,63				

Inicialmente, cabe destacar aqueles eventos que foram registrados pelo amostrador inteligente ISCO – LOGGER, mas que por algum motivo específico as amostras não foram analisadas em laboratório. Os eventos 1, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, fazem parte deste grupo (Figuras 7.1 a 7.9). No entanto, representam um conjunto de eventos de diversas magnitudes de combinação precipitação – escoamento superficial que destacam a distribuição de amostragem ao longo do evento e a flexibilidade da amostragem inteligente utilizada para a melhor representação do escoamento superficial.

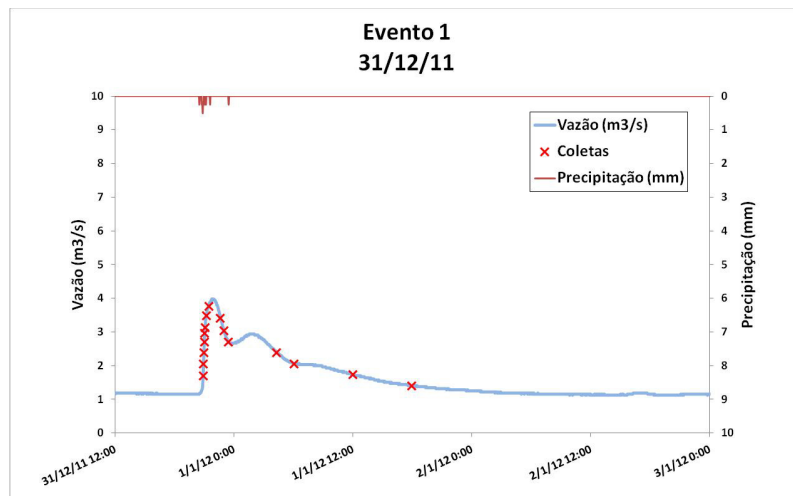


Figura 7.1 – Evento 1

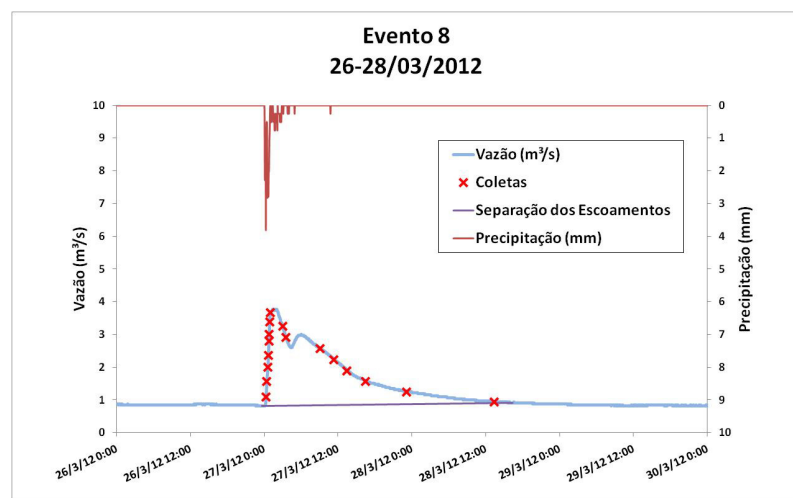


Figura 7.2 – Evento 8

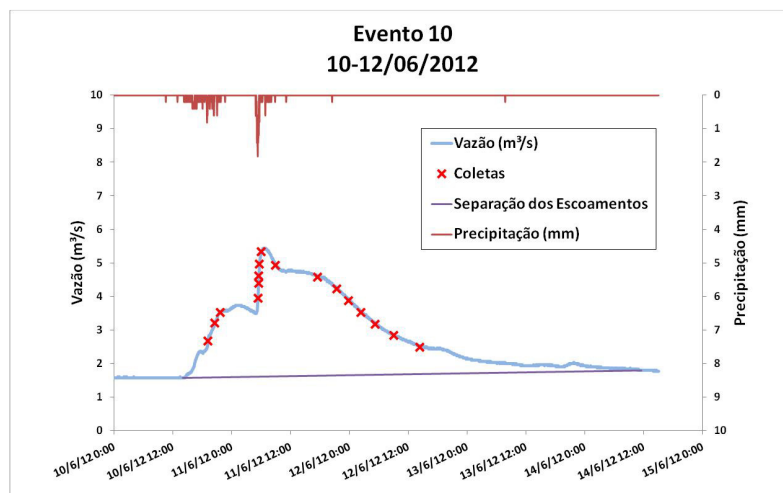


Figura 7.3 – Evento 10

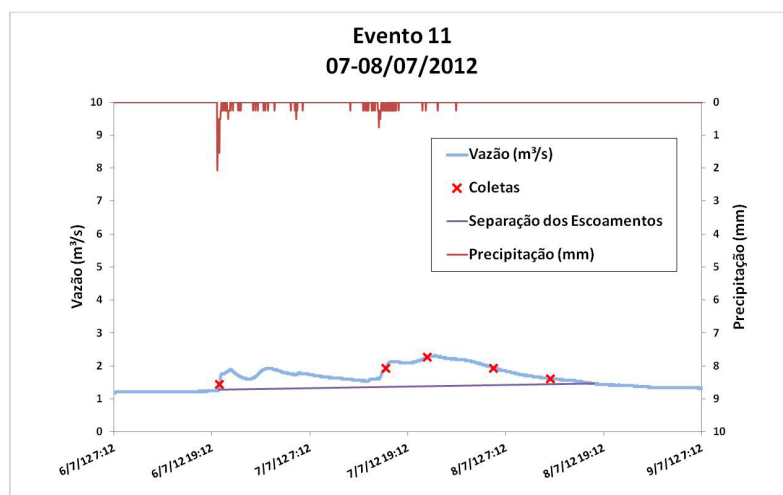


Figura 7.4 – Evento 11

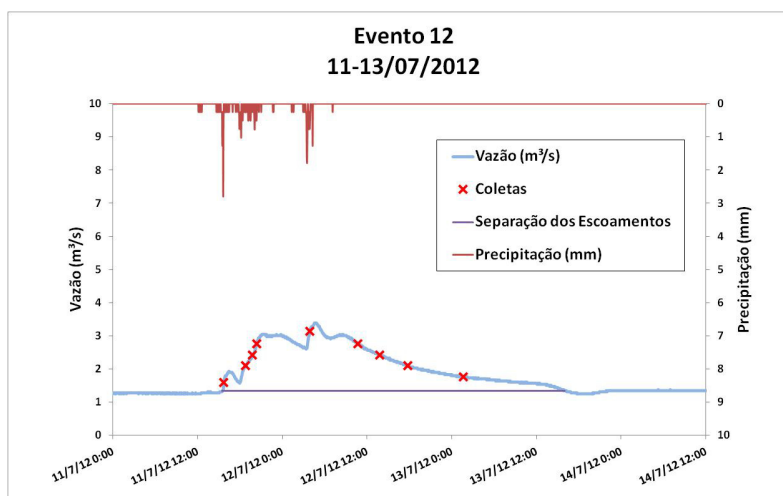


Figura 7.5 – Evento 12

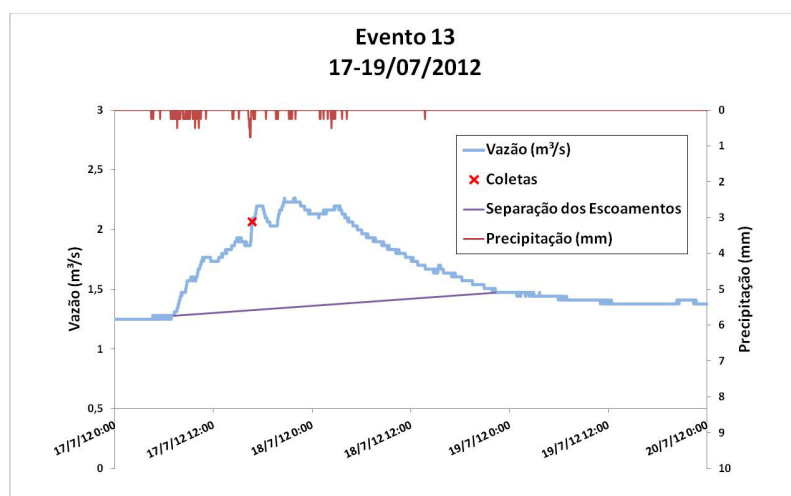


Figura 7.6 – Evento 13

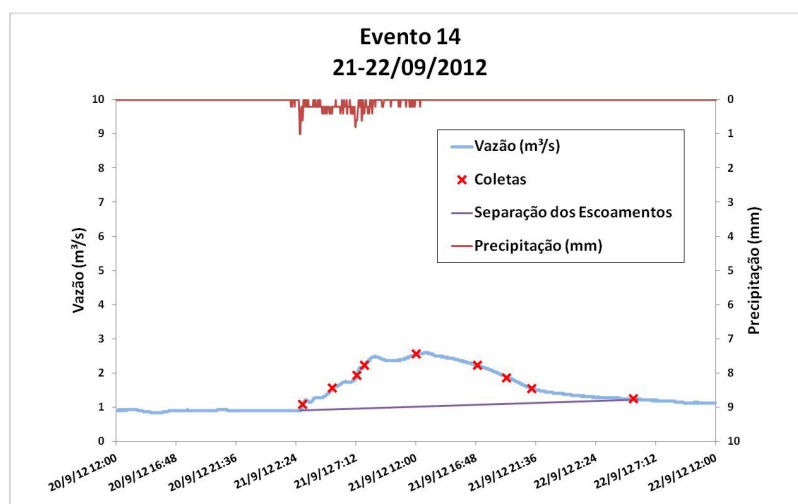


Figura 7.7 – Evento 14

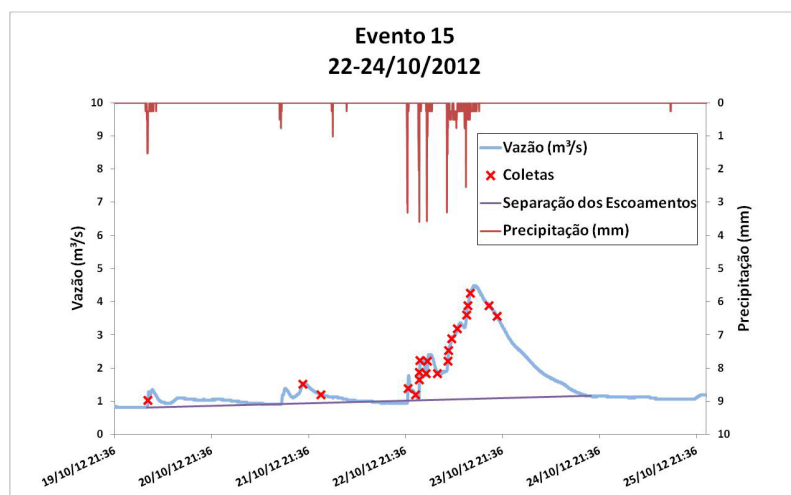


Figura 7.8 – Evento 15

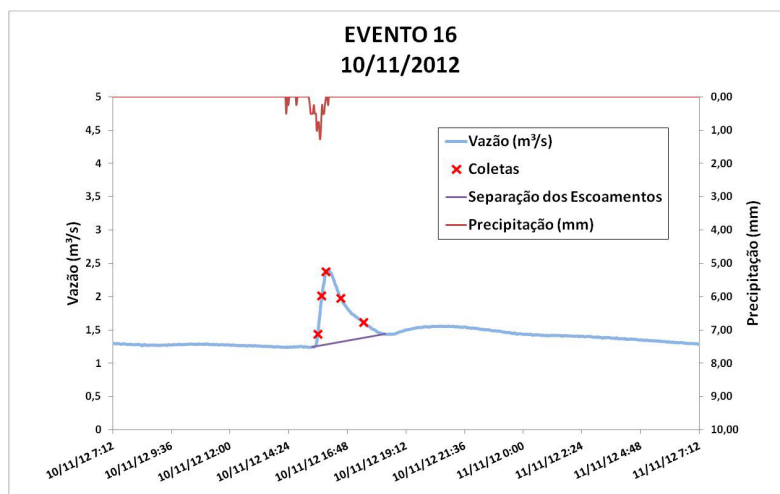


Figura 7.9 – Evento 16

Os eventos com resultados analisados em laboratório, estão indicados a seguir. Os hidrogramas apresentados nas Figuras 7.10 a 7.18 indicam as características do Escoamento Superficial o monitorado e as concentrações médias do evento para os parâmetros analisados.

Dentre os eventos desta seção, destaca-se o de número 3. O comportamento da seção não pode ser explicado por problemas na estação. O evento foi dividido em 3a e 3b para efeitos do cálculo dos EMCs.

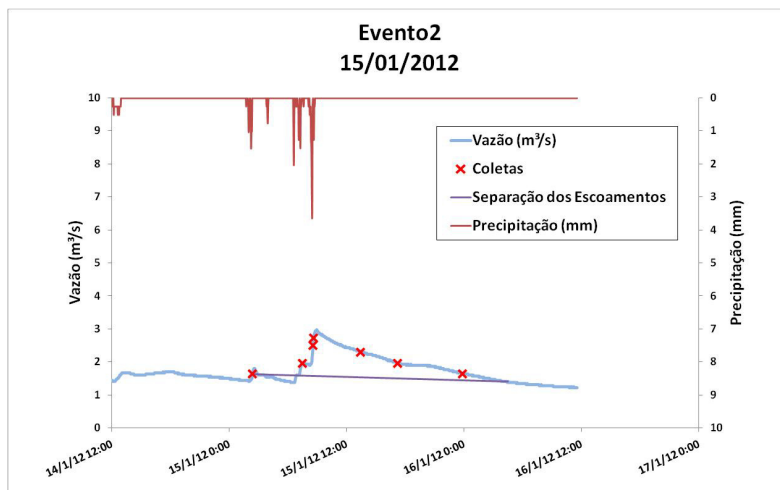


Figura 7.10 – Evento 2

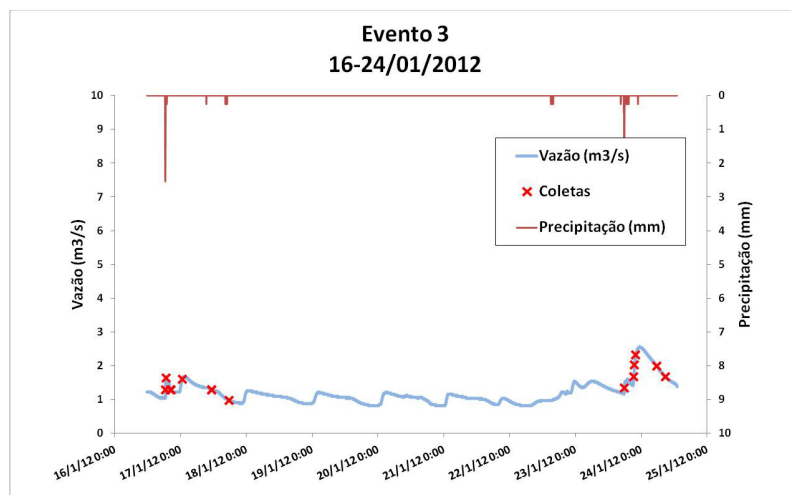


Figura 7.11 – Evento 3

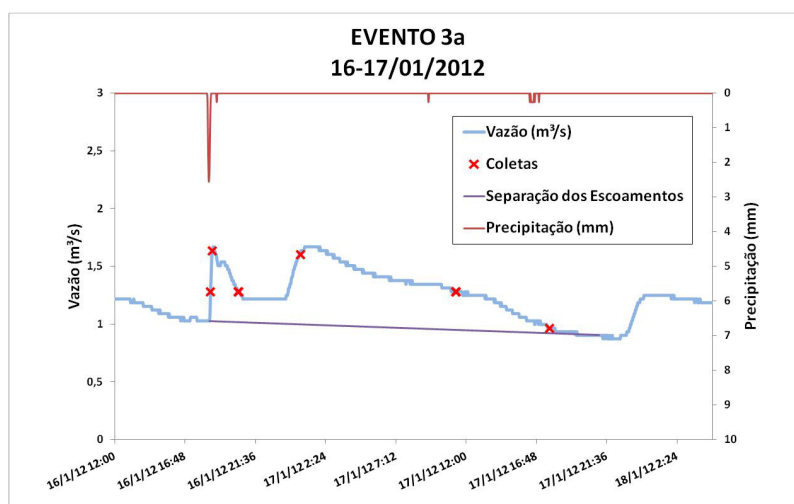


Figura 7.12 – Evento 3a

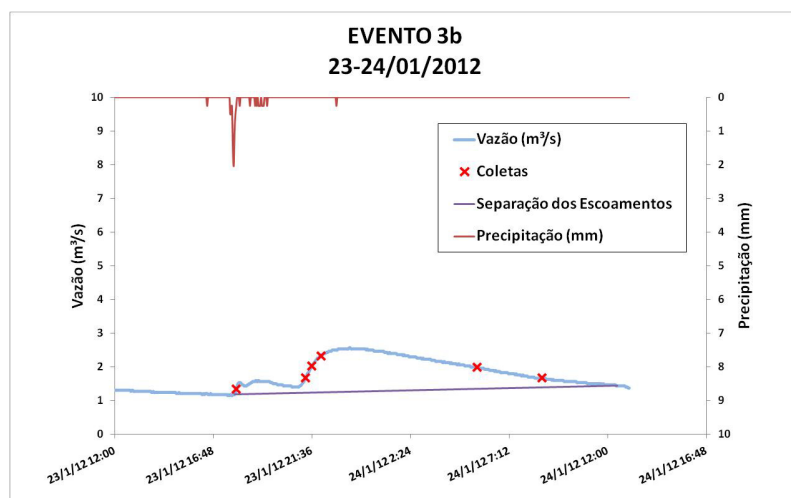


Figura 7.13 – Evento 3b

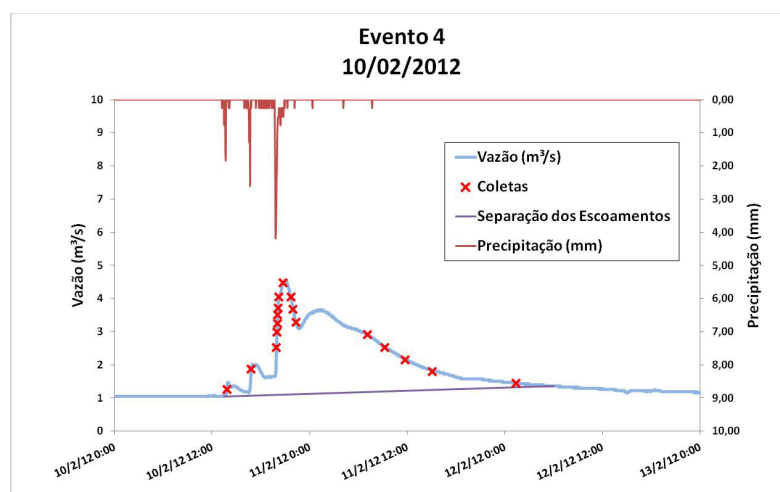


Figura 7.14 – Evento 4

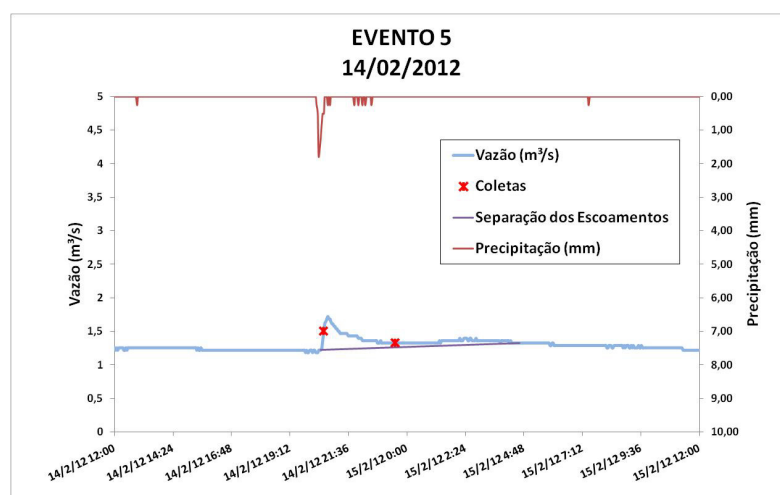


Figura 7.15 – Evento 5

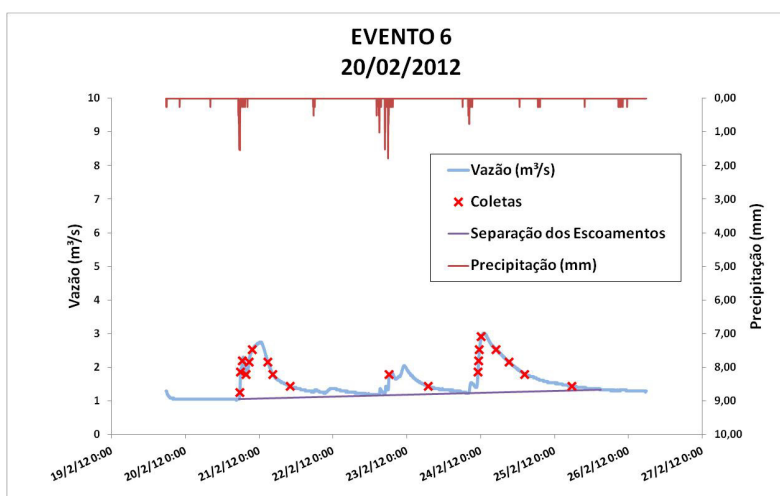


Figura 7.16 – Evento 6

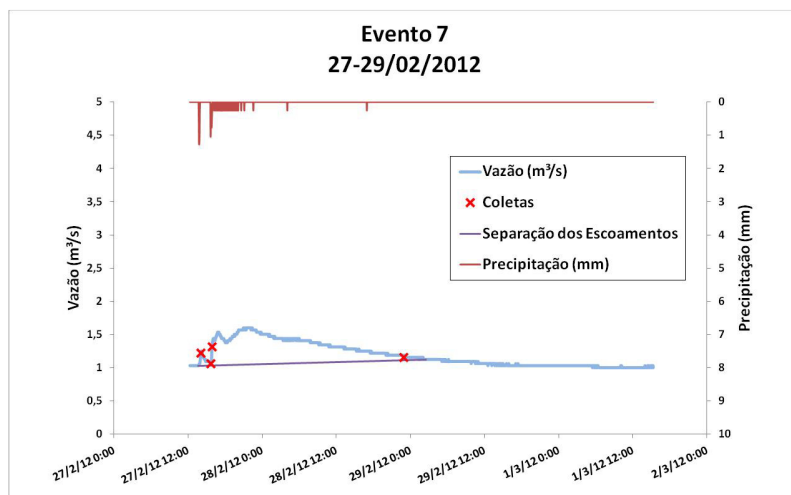


Figura 7.17– Evento 7

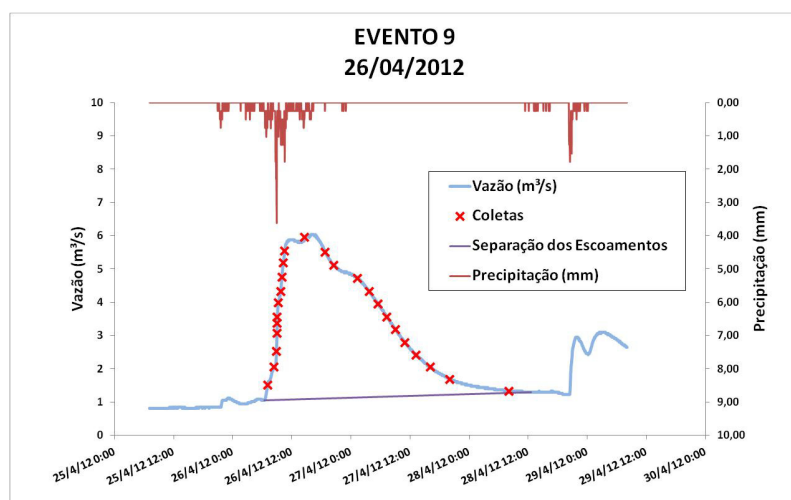
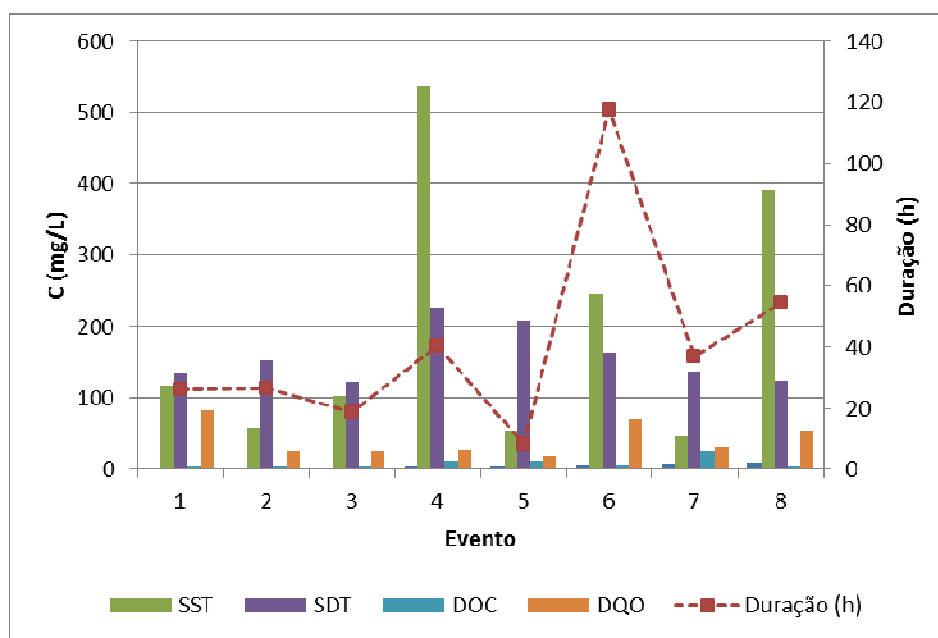


Figura 7.18 – Evento 9

Os eventos estudados destacam aspectos hidrológicos relevantes, que frequentemente são desprezados no monitoramento quali-quantitativo. O monitoramento indicado registra uma variedade de eventos com duração entre 8 h a 117 h e volumes escoados superficialmente entre 3.000 e 390.000 m³. O Impacto em termos de qualidade da água pode ser avaliado no Quadro 7.4 para a série de sólidos (Totais Fixos e Voláteis – STF e STV, Suspensos Totais, Fixos e Voláteis – SST, SSF e SSV, Dissolvidos Totais, Fixos e Voláteis – SDT, SDF e SDV), Carbono Orgânico, Inorgânico e Total Dissolvido (COD, CID). Na Figura 7.22, é apresentada a síntese das principais informações e o impacto dos resultados principais.

Quadro 7.4 – Resultados de EMC para os eventos analisados

	EVENTO							
PARÂMETRO	2	3a	3b	4	5	6	7	9
Vazão Superficial (m ³)	36.698	30.539	40.723	147.221	3.067	188.508	34.839	390.332
Duração (h)	26,1	26,6	18,6	40,5	8,2	117,5	36,9	54,2
Vazão Média (m ³ /s)	0,390	0,319	0,607	1,010	0,104	0,446	0,262	2,002
	EMC							
(ST) (mg/L)	251,0	210,6	224,5	763,4	262,5	408,9	180,9	515,3
(STF) (mg/L)	207,4	135,7	84,8	574,3	156,6	323,5	152,8	224,3
(STV) (mg/L)	43,7	74,9	139,7	189,2	105,9	85,4	28,1	42,2
(SST) (mg/L)	117,5	58,2	101,6	536,6	53,6	244,7	45,5	390,9
(SSF) (mg/L)	106,8	44,4	82,6	452,0	54,9	219,2	41,4	302,5
(SSV) (mg/L)	10,7	13,9	19,0	84,5	2,0	25,4	4,1	88,4
(SDT) (mg/L)	133,5	152,3	122,9	226,9	208,9	164,3	135,4	124,4
(SDF) (mg/L)	100,6	91,3	49,6	122,2	101,7	110,7	111,4	78,2
(SDV) (mg/L)	33,0	61,0	120,7	104,7	107,2	60,0	24,0	46,2
(SSed) (ml/L)	0,7	0,5	0,3	1,5	0,4	0,7	1,0	1,6
TDC (mg/L)	10,6	23,6	7,8	3,6	28,0	19,1	27,1	20,0
DOC (mg/L)	2,3	2,3	3,6	11,1	11,7	5,5	26,6	2,6
TDC (mg/L)	10,6	23,6	7,8	3,6	28,0	19,1	27,1	20,0
DIC (mg/L)	8,3	21,4	4,2	7,5	16,3	13,6	0,5	17,4
DQO (mg/L)	82,9	24,4	25,3	28,4	17,6	68,8	30,8	54,3

**Figura 7.19 – Variabilidade do EMC para os principais parâmetros de Qualidade da Água com a duração do Evento Pluvial.**

Os resultados demonstram que o principal impacto em termos de alteração de qualidade da água está no aporte de sólidos, como tradicionalmente esperado. No entanto, o resultado mais relevante é que o evento individual de maior impacto não está necessariamente associado ao evento de maior duração. O evento 4, com duração de 40 horas foi o que produziu o maior impacto em termos de sólidos suspensos e dissolvidos (530 mg/L e 226 mg/L), porém não apresenta o maior impacto do ponto de vista de matéria orgânica. Destaque-se que o evento 1, com duração de 26 horas foi o que produziu maior impacto orgânico.

7.3 RESULTADOS 2ª FASE: AMOSTRAGEM INTELIGENTE REALIZADA TANTO PELO ISCO-LOGGER QUANTO PELO SBN, E COM A UTILIZAÇÃO DE SENSOR DE TURBIDEZ.

Durante este período foi testado o amostrador automático SBN, projetado e construído para realizar a coleta de amostras pelo método da amostragem inteligente. A configuração do programa do amostrador inteligente SBN manteve os mesmos parâmetros de utilização que foram previamente testados ISCO-LOGGER. Desta forma foi possível comparar o desempenho da amostragem realizada pelos dois aparelhos, sendo o espelhamento de amostragens uma boa indicação de bom desempenho do amostrador SBN. O amostrador ISCO-LOGGER permaneceu realizando coletas de amostras pelo método da amostragem inteligente.

A introdução do sensor de turbidez na estação foi realizada com o objetivo de produzir um parâmetro de comparação de desempenho das amostragens. Como as leituras do sensor são realizadas a cada 150 segundos, tornou-se possível calcular com bastante exatidão o valor da turbidez média dos eventos para poder utilizar este parâmetro como referência de comparação para com valores calculados a partir das amostras coletadas.

Como são conhecidas leituras de turbidez para todo o desenrolar do evento, também foi tornado possível simular os resultados da amostragem temporizada. Valores lidos para a turbidez foram colhidos em intervalos de duas horas, contados a partir do início do evento, até o seu final ou até o limite de 24 valores, correspondentes aos 24 frascos de coleta dos amostradores automáticos comerciais. Com estes valores foi possível calcular o valor da turbidez média dos eventos que teria sido obtido caso o processo de amostragem temporizada tivesse sido adotado.

A comparação entre os valores da turbidez média do evento calculados por meio de todas as leituras de turbidez do evento, e os calculados pelos resultados das análises das amostras coletadas por meio da amostragem inteligente e, ainda, com os valores calculados

pelos resultados das leituras bi-horárias da turbidez comprovam a qualidade do processo da amostragem inteligente.

Adicionalmente, os valores do EMC foram calculados para os demais parâmetros de qualidade da água, tendo por base os instantes da amostragem temporizada. Os valores da concentração de poluentes nestes instantes foram obtidos por meio de interpolação linear efetuada com base em amostras reais coletadas em momentos próximos aos desejados. No Quadro 7.5, são apresentadas as principais características dos eventos desta segunda fase do estudo.

Quadro 7.5 – Amostradores ISCO e SBN operando em paralelo

SBN E SENSOR DE TURBIDEZ ENTRAM EM OPERAÇÃO										
Evento No			ISCO	SBN	Comentário					
	Início	Duração	Amostras Comandadas	Amostras Comandadas		início	Amostras Analisadas		DQO	Metais
	Fim		Amostras Coletadas	Amostras Coletadas		Pico	Sólidos	Turbidez	DOC	
17	02/12/2012	17	17	12	Estouro de Mangueira SBN	0,32	17			✓
	03/12/2012		17	0		0,98	✓	✓		
18	12/12/2012	14	25	10	Estouro de Capacidade do Isco	0,29	24 ISCO + 3 SBN		✓	
	13/12/2012		24	3		1,55	✓	✓		
19	21/12/2012		1	0	evento sem sequência	0,28	0			
			1							
20	27/12/2012	125	14	12		0,29	14 ISCO + 12 SBN		✓	✓
	02/01/2013		14	12		0,64	✓	✓		
21	16/01/2013	14	12	7		0,28	12 ISCO + 6 SBN			✓
	17/01/2013		12	7		0,73	✓	✓		
22	18/01/2012	22	7	7		0,28	0			
	19/01/2012		7	7		0,63				
23	01/02/2013	63	9	8	Sbn falhou primeira amostra	0,26	9 ISCO + 7 SBN		✓	✓
	04/02/2013		9	7		0,61	✓	✓		
24	17/02/2013	22	24	7	ISCO falhou	0,28	0 ISCO + 7 SBN		✓	✓
	22/02/2013		0	7		0,63			✓	

Dentre os eventos relacionados nesta seção destaca-se o de número 24, no qual houve uma falha de comunicação entre o LOGGER e o ISCO, motivo pelo qual nenhuma amostra foi coletada pelo ISCO-LOGGER. Apenas sete amostras foram coletadas pelo SBN em função do aparelho ter desperdiçado frascos em um pequeno evento anterior. O evento 19 também se destaca pela falta de sequência.

Os resultados apresentados nesta seção para amostragem temporizada são simulações obtidas por meio das coletas realizadas pelo amostrador ISCO-LOGGER. Valores da Turbidez Média do Evento são calculados com base em leituras do sensor automático existente na estação. Nas Figuras 7.23 a 7.40 são apresentados resultados que sintetizam os eventos monitorados e cujos principais resultado de EMC são apresentados na tabela 7.6.

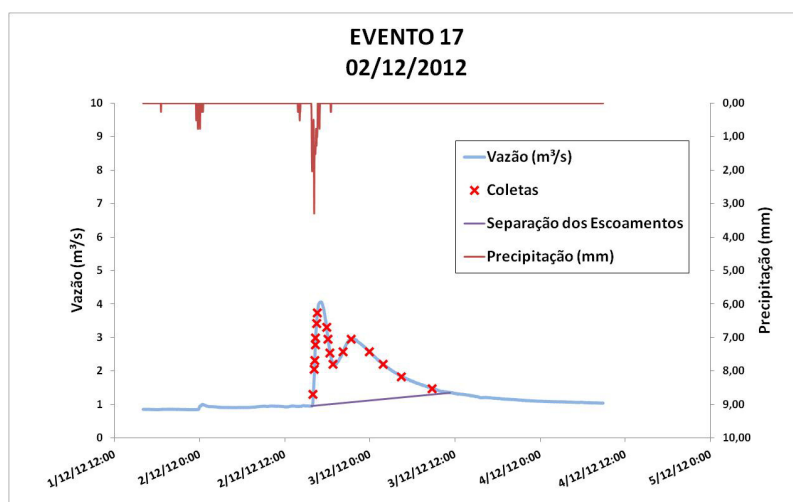


Figura 7.20 – Evento 17 (Amostragem Inteligente ISCO-LOGGER)

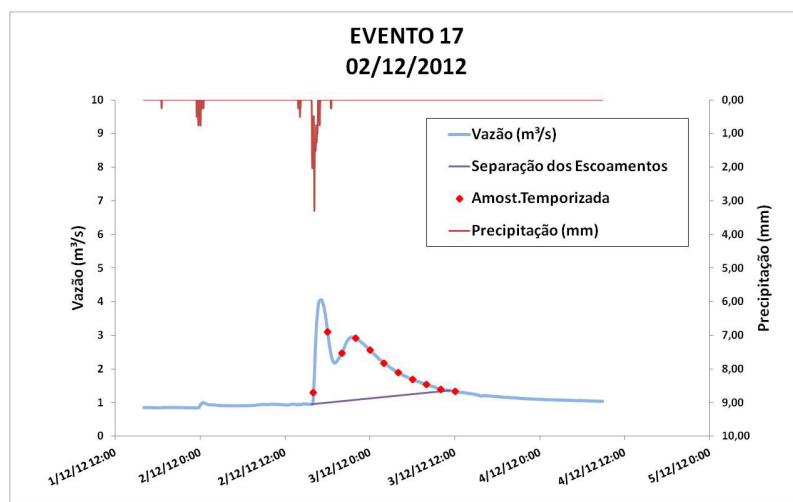


Figura 7.21 – Evento 17 (Amostragem Temporizada Simulada)

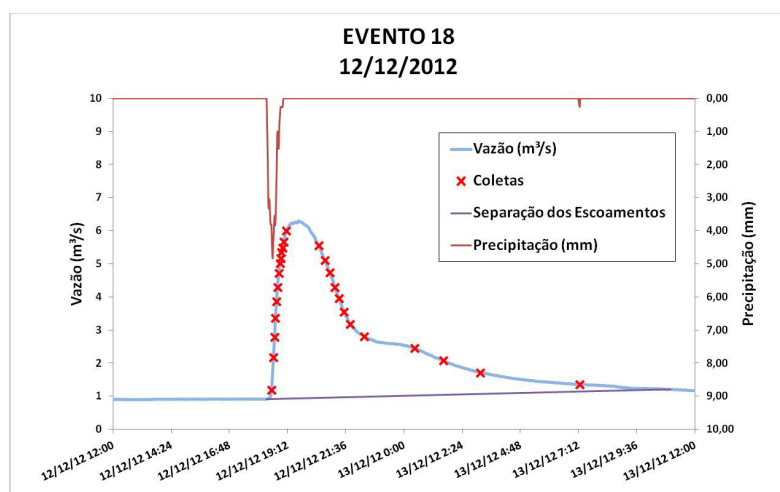


Figura 7.22 – Evento 18 (Amostragem Inteligente ISCO-LOGGER)

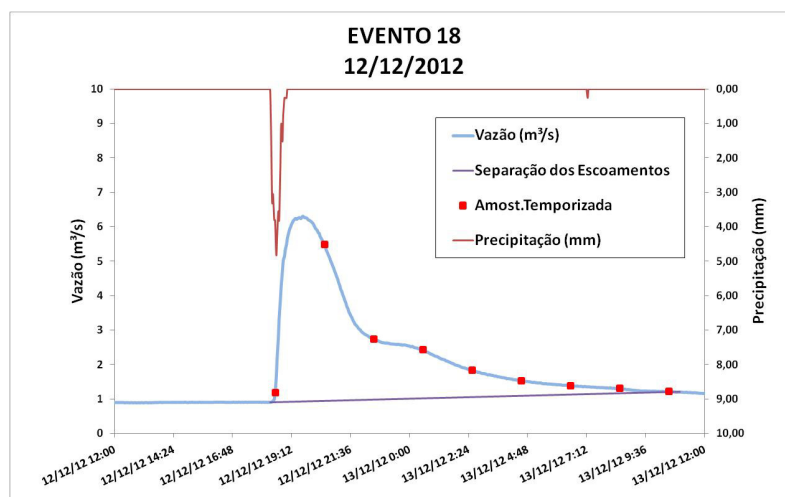


Figura 7.23 – Evento 18 (Amostragem Temporizada Simulada)

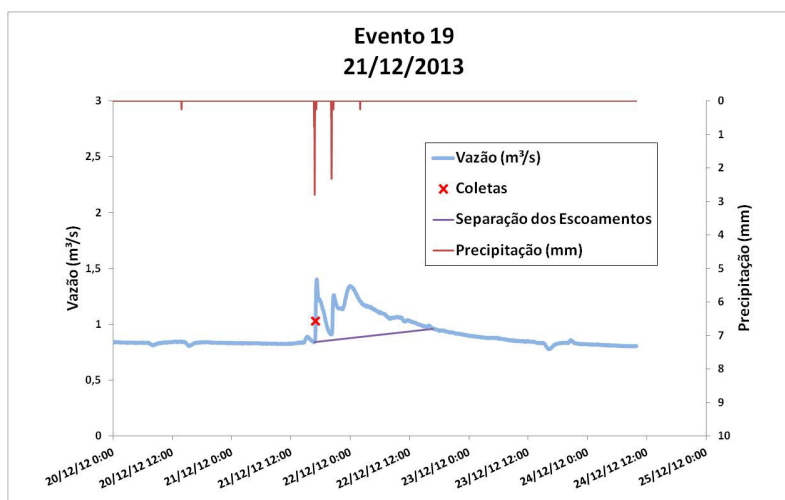


Figura 7.24 – Evento 19 (Evento sem sequência)

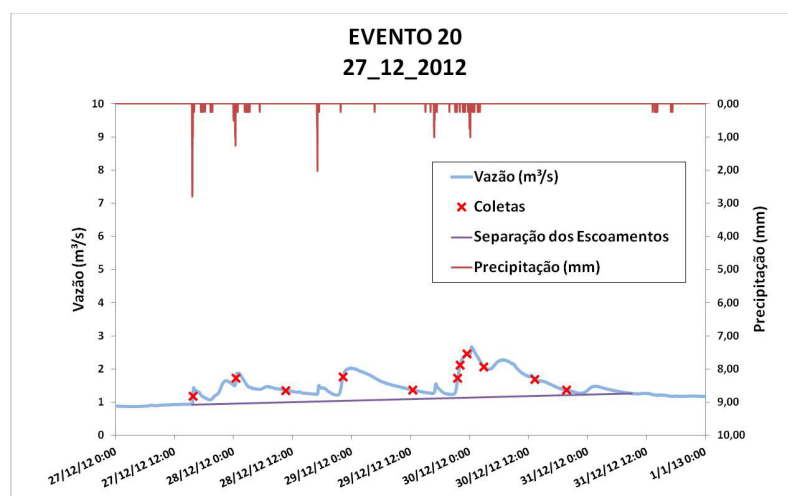


Figura 7.25 – Evento 20 (Amostragem Inteligente ISCO-LOGGER)

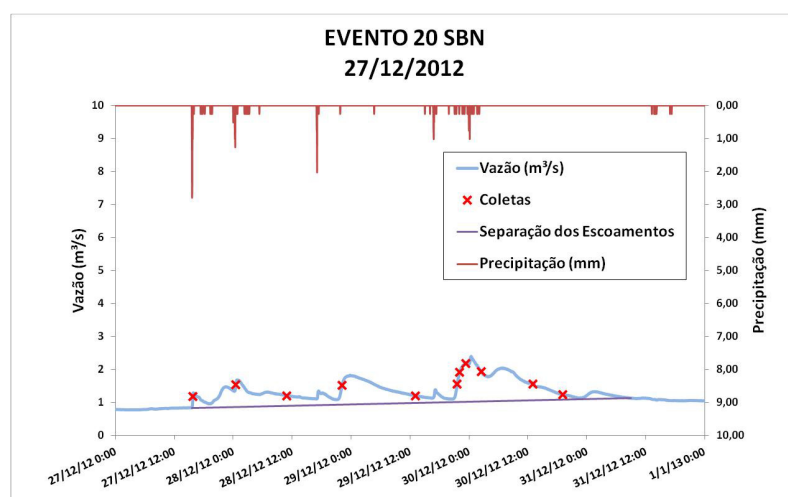


Figura 7.26 – Evento 20 (Amostragem Inteligente SBN)

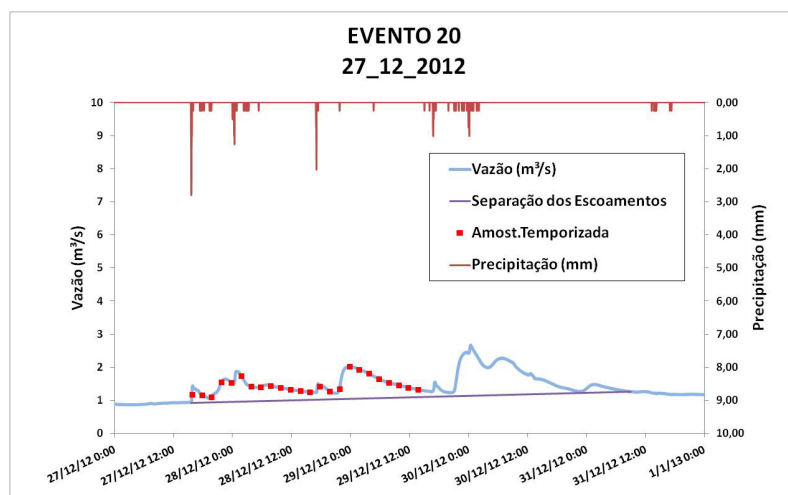


Figura 7.27 – Evento 20 (Amostragem Temporizada Simulada)

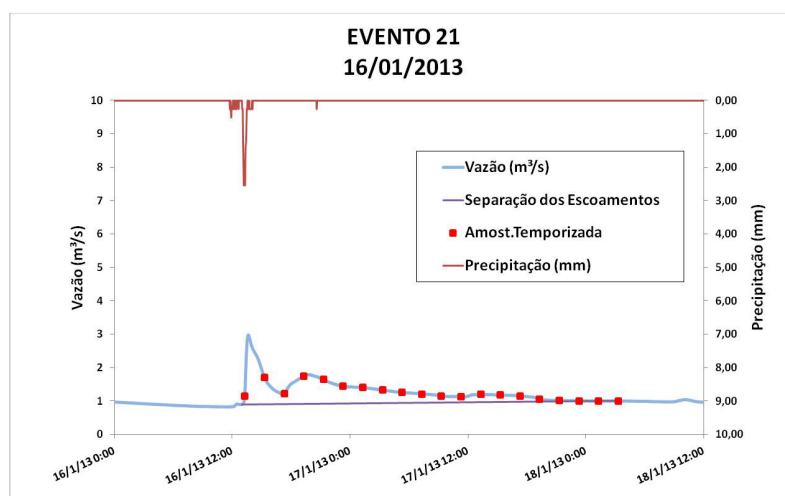


Figura 7.28 – Evento 21 (Amostragem Inteligente ISCO-LOGGER)

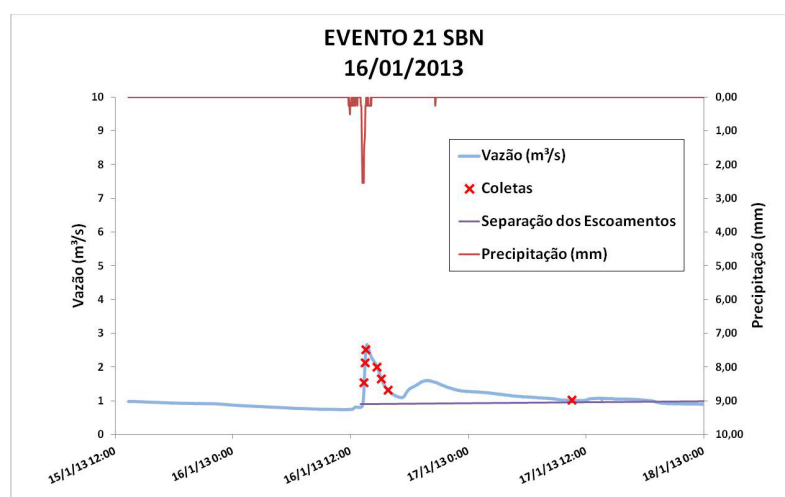


Figura 7.29 – Evento 21 (Amostragem SBN)

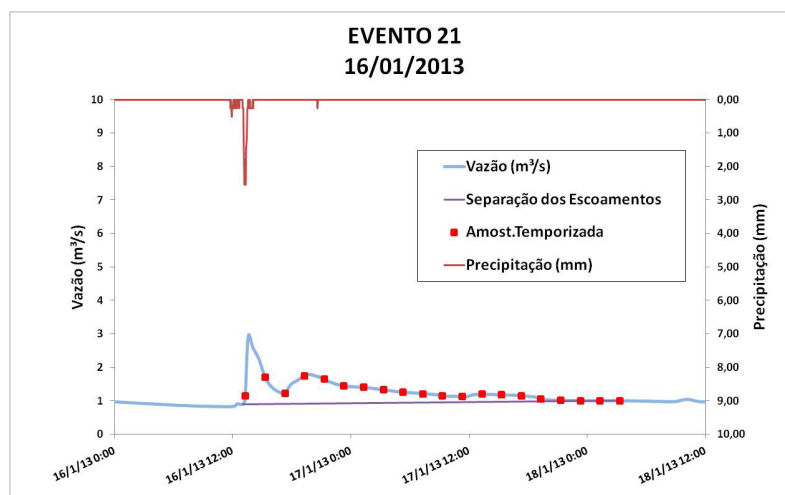


Figura 7.30 – Evento 21 (Amostragem Temporizada Simulada)

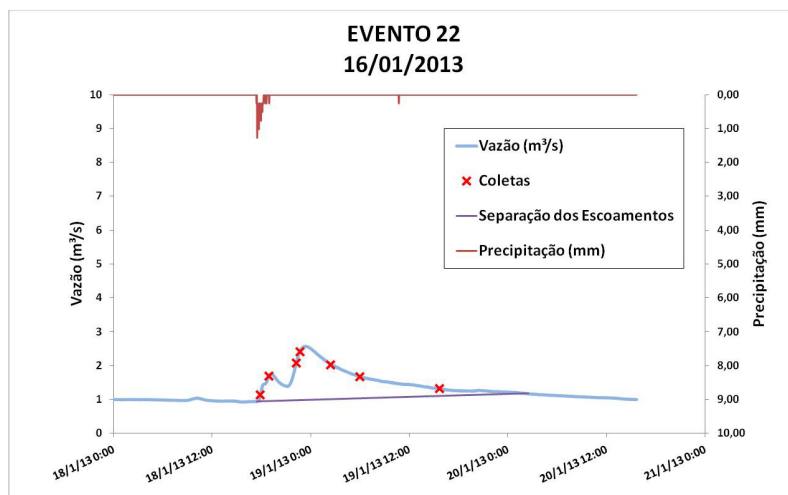


Figura 7.31 – Evento 22 (Amostragem Inteligente ISCO-LOGGER)

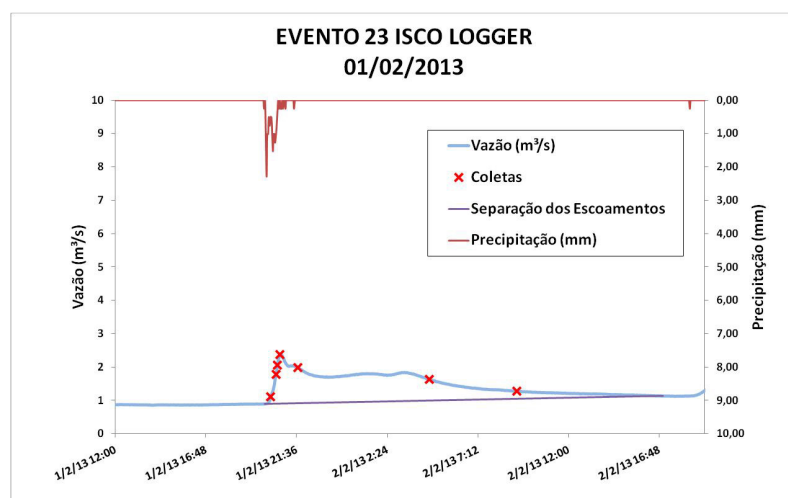


Figura 7.32 – Evento 23 (Amostragem Inteligente ISCO-LOGGER)

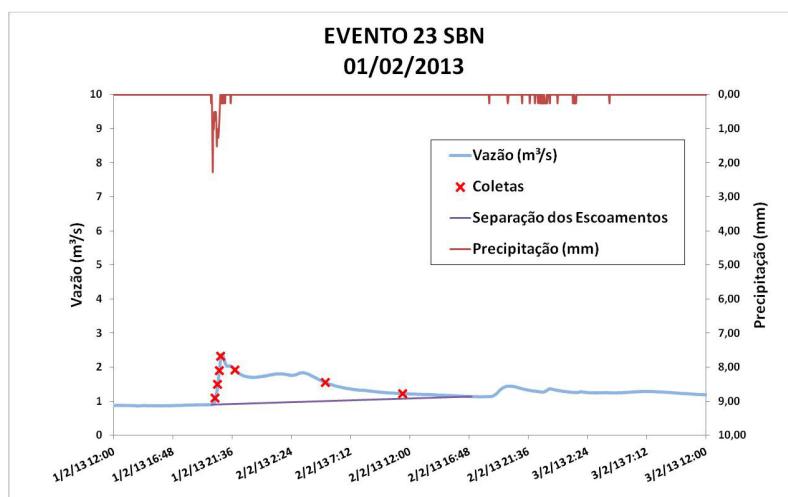


Figura 7.33 – Evento 23 (Amostragem SBN)

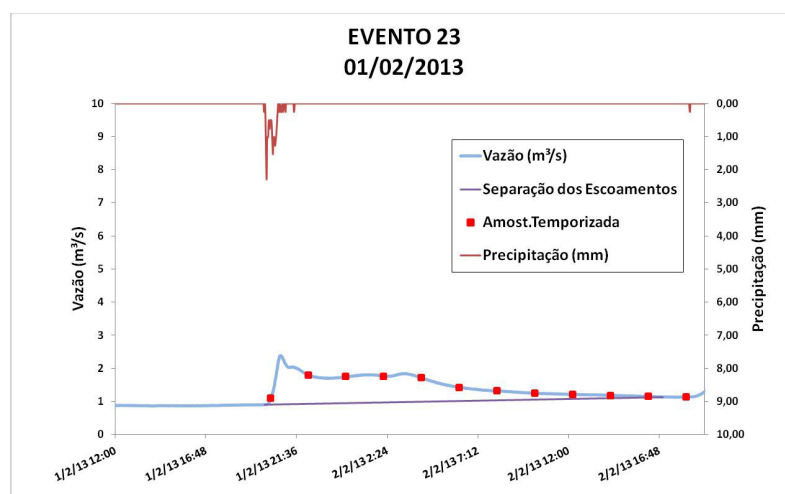


Figura 7.34 – Evento 23 (Amostragem Temporizada Simulada)

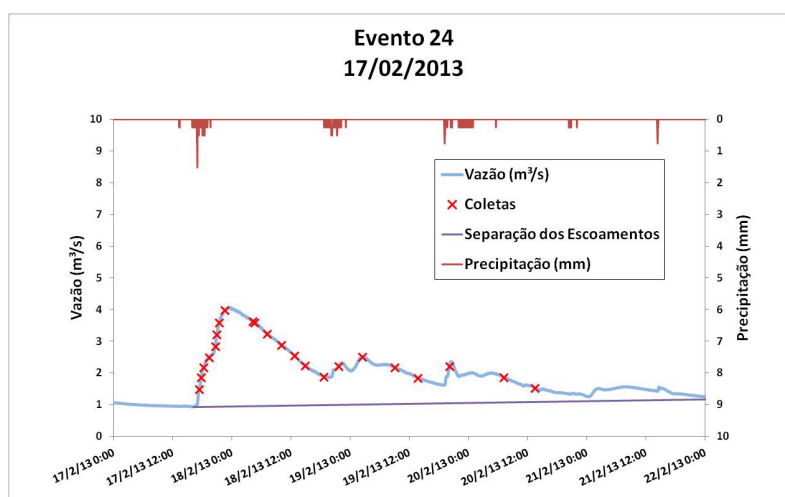


Figura 7.35 – Evento 24 (Amostragem Inteligente ISCO-LOGGER)

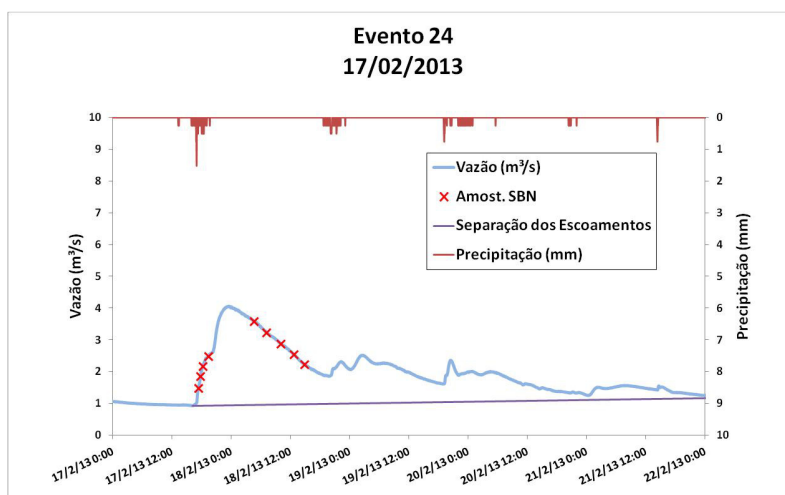


Figura 7.36– Evento 24 (Amostragem Inteligente SBN)

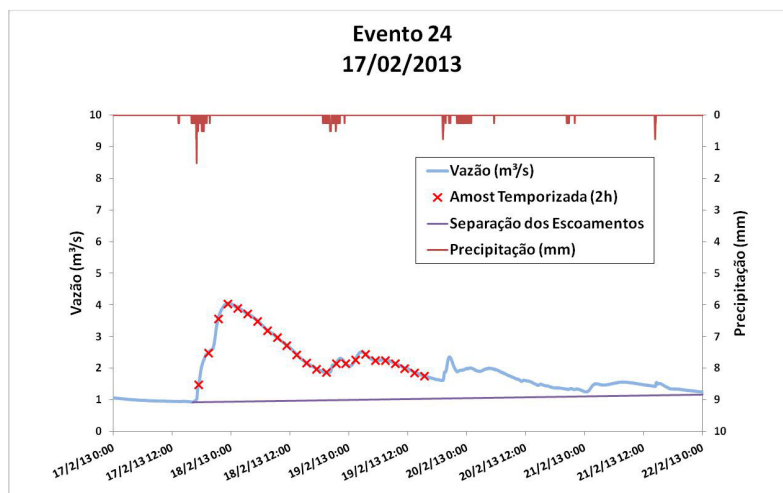


Figura 7.37 – Evento 24 (Amostragem Temporizada Simulada)

Os resultados apresentados indicam a magnitude do erro de avaliação das concentrações médias dos eventos estudados, para o caso da Estação Tamandaré do Rio Barigui, se a amostragem não inteligente não for adotada.

No caso do evento 24, apenas três amostras seriam coletadas durante toda a elevação principal do hidrograma pela amostragem temporizada, contra as oito que foram coletadas pela amostragem inteligente promovida pelo conjunto ISCO-LOGGER. A diferença pode ser observada quando se apresenta a evolução da turbidez ao no evento (Figura 7.38)

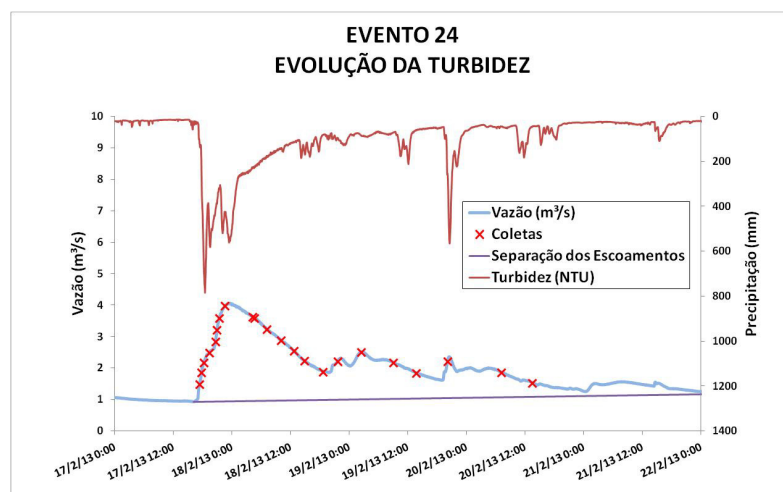


Figura 7.38 – Evento 24 – Evolução da Turbidez

Como pode ser observado, o principal pico da turbidez ocorre antes do pico da vazão, caracterizando a lavagem inicial, em uma região plenamente amostrada pela

amostragem inteligente, com 8 amostras de um total de 22 amostras bem distribuídas ao longo do evento.

Em comparação, a amostragem temporizada dedicaria apenas 3 amostras de um total de 24 amostras, que se concentram na recessão principal e no primeiro pico secundário do evento.

O efeito desta disparidade pode ser observado em todos os eventos a partir da instalação do sensor de turbidez, pois a turbidez média – que seria obtida pelo método da amostragem temporizada – pode ser calculada tomando por base 24 valores pinçados da série de leituras do sensor, em intervalos de duas em duas horas.

Para a grande maioria dos casos, a amostragem temporizada resultaria em um valor subestimado para a turbidez média do evento, sendo que em alguns casos esta diferença pode chegar a 50%.

Os resultados do cálculo das concentrações médias dos eventos desta fase dos experimentos são apresentados na Quadro 7.6, sobre a qual cabe explicar:

- a) Os eventos foram monitorados pelo sensor de turbidez, e amostrados tanto pelo amostrador inteligente composto pelo conjunto ISCO-LOGGER (na tabela marcado como “INT ISCO”) quanto pelo amostrador inteligente SBN (na tabela marcado como “INT SBN”).
- b) Resultados simulados para uma amostragem temporizada (na tabela marcado como “TEMP SIM”) foram calculados com base em:
 - a. Leituras automáticas reais, tomadas pelo sensor nos momentos adequados, para o caso da turbidez;
 - b. Valores interpolados entre concentrações medidas em amostras coletadas em instantes próximos aos que seriam utilizados para a amostragem temporizada, para todos os demais parâmetros;
- c) Nos eventos 17 e 18, ocorridos logo após a instalação, houve falha mecânica no SBN
- d) No evento 24, houve falha na bateria do ISCO.

Quadro 7.6 - Valores de EMC para diversos parâmetros de Qualidade da Água – 2ª Fase

PARÂM/EVENTO	17		18		20			21			23			24
Vazão Superficial (m3)	74.979		81.142		149.596			48.820			35.489			365.176
Duração (h)	19,5		16,7		89,5			38,2			21,1			109,8
Vazão Média (m3/s)	1,066		1,352		0,464			0,355			0,468			0,924
	INT ISCO	TEMP SIM	INT ISCO	TEMP SIM	INT ISCO	TEMP SIM	INT SBN	INT ISCO	TEMP SIM	INT SBN	INT ISCO	TEMP SIM	INT SBN	INT SBN
(ST) (mg/L)	632,2	533,1	923,5	585,1	408,0	442,8	330,3	422,4	421,0	372,0	605,8	521,8	682,3	419,7
(STF) (mg/L)	511,9	422,7	771,9	470,5	339,1	385,3	241,8	338,6	332,4	278,3	494,7	419,9	582,5	352,7
(STV) (mg/L)	120,3	110,4	151,6	114,6	68,9	57,5	88,5	83,8	88,6	93,6	111,1	101,9	99,8	67,1
(SST) (mg/L)	400,0	296,9	543,6	384,1	160,2	92,9	165,7	256,0	248,8	251,5	451,5	360,0	466,0	289,2
(SSF) (mg/L)	348,2	254,7	462,2	320,4	134,3	79,1	144,8	217,9	212,0	213,8	380,5	301,9	406,7	240,4
(SSV) (mg/L)	51,8	42,2	81,4	63,7	25,9	13,8	21,0	38,1	36,7	37,7	71,0	58,1	59,3	48,8
(SDT) (mg/L)	232,2	236,1	379,9	201,0	247,8	349,9	164,6	166,4	172,2	120,5	154,3	161,8	216,3	130,5
(SDF) (mg/L)	163,6	168,0	309,7	150,0	204,8	306,2	97,0	120,7	120,4	64,6	114,2	118,0	175,8	112,2
(SDV) (mg/L)	68,5	68,1	70,2	51,0	43,0	43,7	67,6	45,7	51,9	55,9	48,4	43,8	40,5	18,3
(SSed) (ml/L)	0,5	0,4	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,6	0,4	0,2	0,0
DOC (mg/L)														75,7
TDC (mg/L)														291,8
DIC (mg/L)														3,1
DQO (mg/L)			67,3	60,1	47,4	39,3	52,5				52,4	47,1	67,1	16,2
Turbidez (NTU)	392,7	313,6	1070,7	553,2	203,8	120,5	203,2	275,9	316,7	285,1	128,9	110,0	144,7	13,0
Cu, (µg/L)	28,3	205,9			0,0	0,0	27,4	7,5	57,0	11,8	0,0	0,0	167,9	25,5
Zn, (µg/L)	45,3	89,4			2,9	5,9	60,8	8,9	54,5	52,7	29,4	26,1	285,8	125,3
Cd, (µg/L)	11,9	14,0			1,8	1,9	2,7	2,1	3,0	1,3	15,1	14,7	25,0	1,8
Mn, (µg/L)	967,3	801,1			96,5	72,4	102,1	118,9	130,7	121,8	1025,6	805,1	1537,3	260,1
Co, (µg/L)	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ni, (µg/L)	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pb, (µg/L)	136,8	115,2			8,7	61,6	45,3	42,0	58,6	135,7	161,3	109,9	146,0	20,3
Cr, (µg/L)	0,0	0,0			14,6	0,0	8,9	0,5	5,8	4,4	0,0	0,0	0,0	1,7
Al, (mg/L)	7,2	5,9			4,9	3,2	4,4	1,6	1,9	3,3	8,4	6,7	3,3	9,1
Fe, (mg/L)	7,7	6,1			4,3	2,5		3,9	4,3	3,5				

Dos resultados apresentados no Quadro 7.6, é importante observar que nos eventos 20, 21 e 23, amostrados de maneira inteligente pelo ISCO-LOGGER e pelo SBN, os resultados das análises para a grande maioria dos parâmetros é similar. Resultados para a Turbidez chegam a ser os mesmos no evento 20. Diferenças podem ser explicadas pelo tempo de enchimento das garrafas, que é um pouco maior no SBN em relação ao ISCO.

Também é importante observar que para todos os parâmetros a simulação da amostragem temporizada demonstra que esta técnica produziria resultados inferiores ao registrado pelos amostradores inteligentes.

Fato merecedor de menção, a concentração de Manganês é relativamente alta em todas as amostras, culminando em mais de 1mg/L no evento 23.

7.4 RESULTADOS 3ª FASE: AMOSTRAGEM INTELIGENTE REALIZADA PELO SBN, AMOSTRAGEM TEMPORIZADA RELIZADA PELO ISCO, SENSOR DE TURBIDEZ OPERNADO NA ESTAÇÃO

Nesta fase do estudo buscou-se amostrar um evento com os dois amostradores automáticos operando de formas diferentes. O amostrador SBN cumpriu a função de coletar amostras pelo método da amostragem inteligente. Já o amostrador ISCO foi ajustado para realizar coletas em intervalos de 2 horas, uma vez iniciado o evento. Deve-se considerar a limitação do amostrador SBN, que em sua versão protótipo possui apenas 12 frascos individuais para a coleta de amostras.

Os dois primeiros eventos foram registrados apenas pelo SBN, em função de falhas no comando do amostrador ISCO. Na Tabela 7.7, são apresentados os três eventos que foram registrados nesta fase do estudo. O Datalogger continuou a registrar os instantes em que a amostragem inteligente poderia ser realizada pelo conjunto ISCO-LOGGER, para que se pudesse continuar a comparação dos valores pela turbidez. Nas Figuras 7.41 a 7.47 são apresentados os resultados compilados do monitoramento observado e com os parâmetros de qualidade da água indicados na Quadro 7.8.

Quadro 7.7 –Amostrador SBN (amostragem Inteligente) operando em paralelo com ISCO (amostragem temporizada)

ISCO TEMPORIZADO + SBN										
Evento No			ISCO	SBN	Comentário					
	Início	Duração (h)	Amostras Comandadas	Amostras Comandadas		início (m)	Amostras Analisadas		DQO	Metais
	Fim		Amostras Coletadas	Amostras Coletadas		Pico (m)	Sólidos	Turbidez	TOC	
25	26/02/2013	26		12	Falha no ISCO	0,29	12 SBN		√	√
	27/02/2013		0	12		0,92	√	√	√	
26	06/03/2013	42		12	Falha no ISCO	0,26	12 SBN		√	√
	08/03/2013		0	12		1,02	√	√	√	
27	13/03/2013	23		12		0,28	12 SBN + 12 ISCO		√	√
	14/03/2013		12	12		1,14	√	√	√	

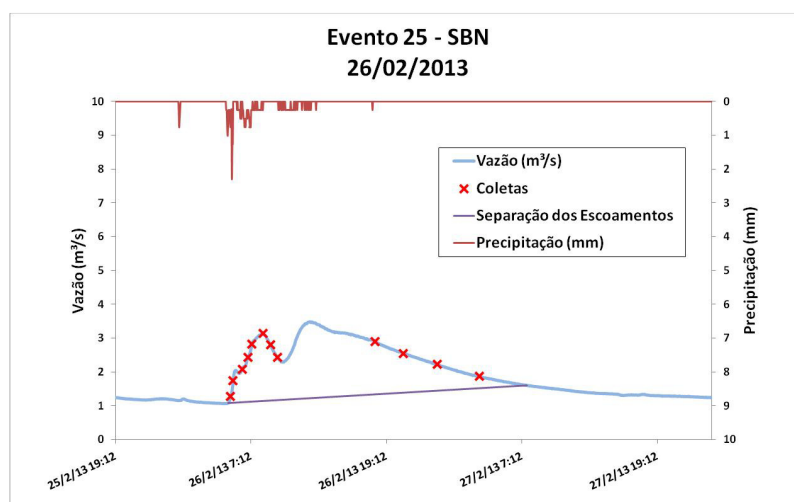


Figura 7.39 – Evento 25 – Amostragem Inteligente SBN

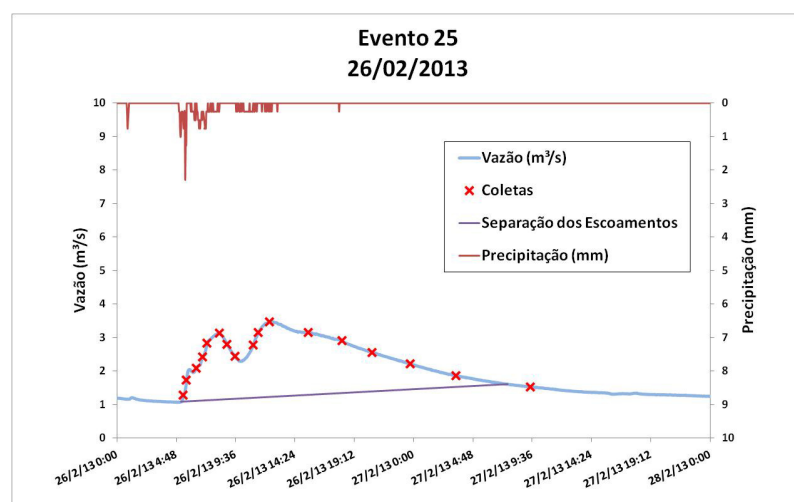


Figura 7.40 – Evento 25 – Amostragem Inteligente Completa

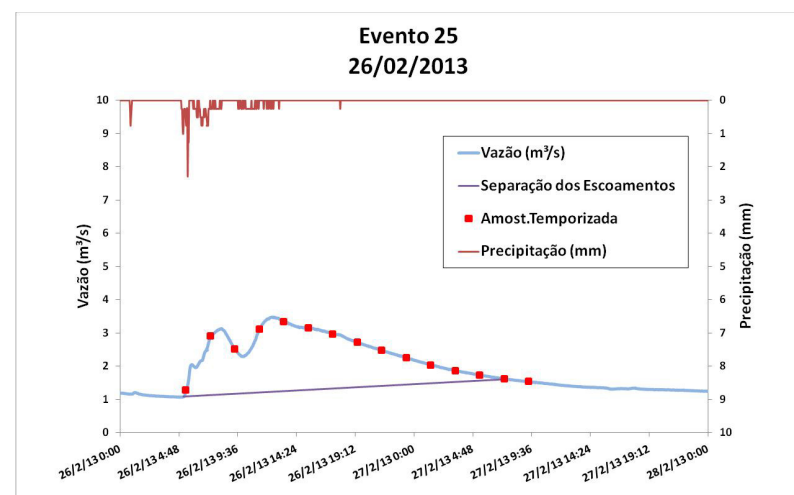


Figura 7.41 – Evento 25 – Amostragem Temporizada Simulada

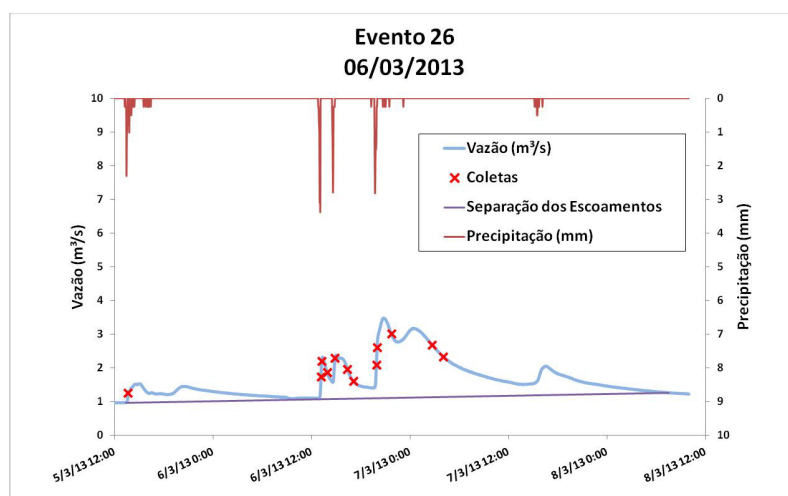


Figura 7.42 – Evento 26 – Amostragem Inteligente SBN

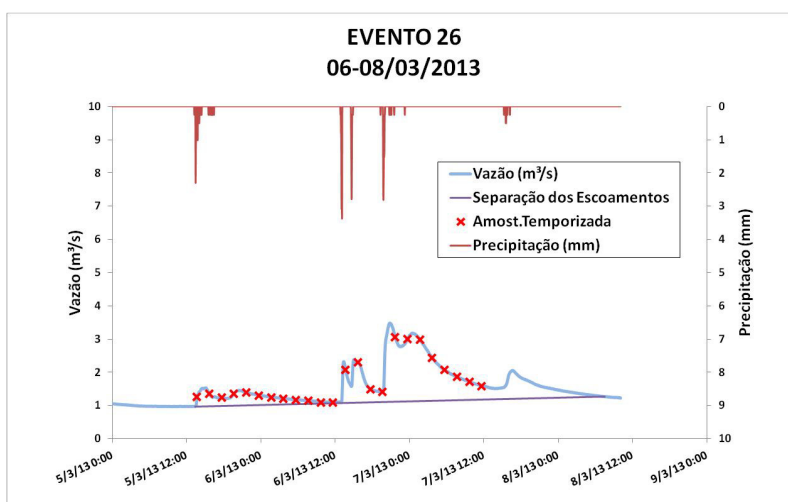


Figura 7.43 – Evento 26 – Amostragem Temporizada Simulada

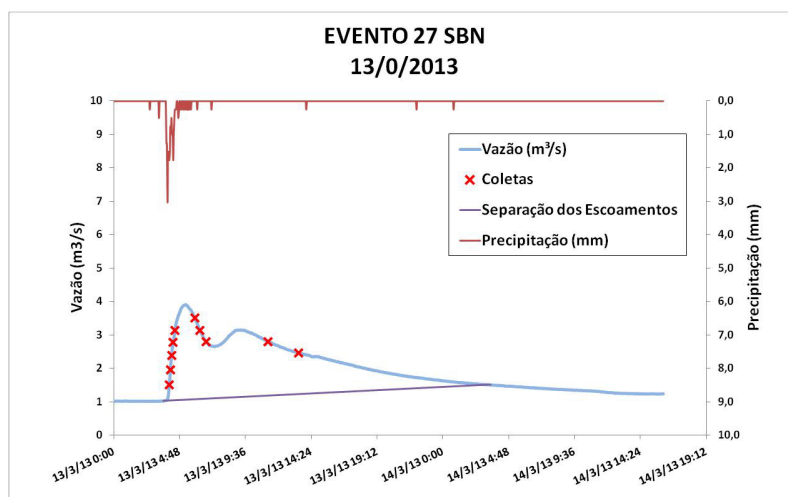


Figura 7.44 – Evento 27 – Amostragem Inteligente SBN

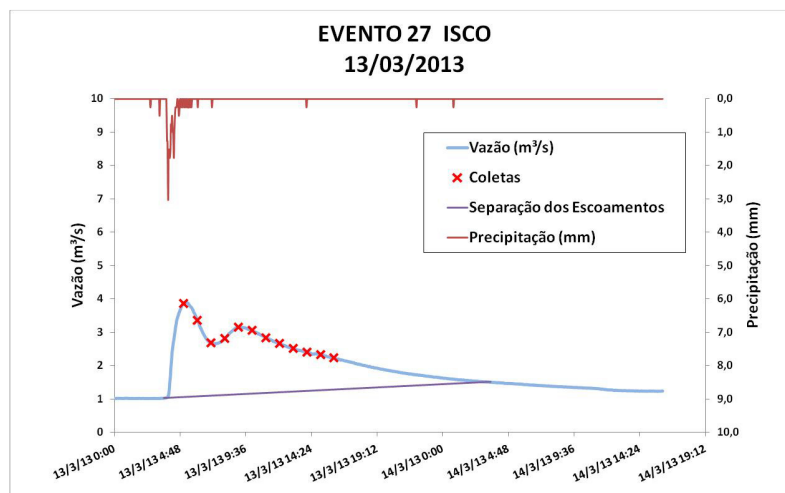


Figura 7.45 – Evento 28 – Amostragem Temporizada ISCO

Sobre esta fase do estudo cabe ressaltar:

- (a) Todos os eventos desta fase foram amostrados pelo SBN, dentro das limitações do próprio protótipo (seis frascos de coleta reservados para elevação do nível e outros seis para a recessão;
- (b) O amostrador ISCO foi revertido para amostragem temporizada;
- (c) O programa de amostragem inteligente instalado no datalogger da estação continuou a ser executado, mas sua comunicação com o ISCO foi inibida. Desta forma continuaram a ser registrados os momentos nos quais a amostragem inteligente que seria feita pelo conjunto ISCO-LOGGER. A amostragem inteligente completa, mostrada na Figura 7.42 a título de informação complementar, foi construída com estes dados;
- (d) Os eventos 25 e 26 não foram amostrados pelo ISCO em função de problemas mecânicos;
- (e) O evento 27 foi amostrado pelos dois equipamentos, de maneira inteligente pelo SBN, e temporizada pelo ISCO.

No Quadro 7.8 são apresentados resultados das análises realizadas nas amostras coletadas nos três eventos desta fase.

Quadro 7.8 – Resultados do EMC para eventos da 3ª fase.

PARÂMETRO	EVENTOS			
	25	26	27	
Volume Superficial (m ³)	109309	131798	98877	
Duração (h)	26,5	66,1	23,9	
Vazão Média (m ³ /s)	1,148	0,554	1,150	
	EMC AMOSTRAGEM INTELIGENTE SBN	EMC AMOSTRAGEM INTELIGENTE SBN	EMC AMOSTRAGEM INTELIGENTE SBN	EMC AMOSTRAGEM TEMPORIZADA ISCO
(ST) (mg/L)	542,8	539,8	756,7	714,8
(STF) (mg/L)	462,0	437,4	648,7	534,0
(STV) (mg/L)	80,8	102,4	108,0	180,8
(SST) (mg/L)	381,7	329,4	578,1	488,8
(SSF) (mg/L)	319,0	283,1	504,5	420,1
(SSV) (mg/L)	62,7	46,3	73,6	68,7
(SDT) (mg/L)	161,2	210,4	178,5	226,0
(SDF) (mg/L)	143,1	154,3	144,2	113,9
(SDV) (mg/L)	25,5	59,4	31,2	112,2
(SSed) (ml/L)	0,1	0,1	0,7	0,6
Turbidez (NTU)	108,2	96,3	536,4	335,9
DOC (mg/L)	2,5	1,7	3,0	2,2
TC(mg/L)	15,1	14,3	14,3	15,7
IC (mg/L)	12,5	12,6	11,3	13,5
DQO (mg/L)	73,8	96,3	144,6	92,8
Cu, (µg/L)	8,5	76,5	32,0	5,0
Zn, (µg/L)	54,4	228,8	72,6	7,0
Cd, (µg/L)	2,3	2,9	0,9	3,5
Mn, (µg/L)	210,3	93,9	253,5	214,5
Co, (µg/L)	0,0	0,0	0,0	0,0
Ni, (µg/L)	0,0	0,0	0,0	0,0
Pb, (µg/L)	22,4	83,9	59,9	45,8
Cr, (µg/L)	0,0	10,5	3,2	0,0
Al, (mg/L)	9,2	8,8	13,9	8,6
Fe, (mg/L)			14,7	10,1

O evento 27 foi amostrado pelos dois amostradores automáticos, SBN e ISCO operando de forma temporizada. É importante ressaltar:

- Doze frascos de amostras foram coletados pelo ISCO até o esgotamento de sua bateria;
- Doze frascos de amostras foram coletados pelo SBN. Dois deles foram desperdiçados em um evento prévio, restando 10 frascos utilizados no evento;
- A comparação entre os valores da Turbidez Média do Evento confirma a submedição teórica observada na 2ª fase dos experimentos. No caso do evento 27, os valores obtidos pela amostragem temporizada são 37% inferiores aos obtidos pela amostragem inteligente;

- d) As concentrações de Manganês continuam elevadas.

7.5 ANÁLISE CRÍTICA

A coleção de eventos amostrados ao longo de todo o período é um banco de dados importante para os estudos do comportamento do transporte de poluentes aportados por via difusa no rio Barigui, a montante da estação Tamandaré.

É importante, entretanto, observar que esta coleção de eventos amostrados reflete o desenvolvimento de uma técnica de amostragem, executado ao longo de 15 meses, nos quais várias dificuldades foram enfrentadas e vencidas, na busca de uma alternativa economicamente viável para a coleta de amostras em várias seções da bacia hidrográfica. Por isso, talvez, o conjunto de eventos amostrados não seja o mais adequado para uma análise profunda, tendo em vista que os aparelhos e as técnicas de amostragem foram sendo aperfeiçoadas ao longo dos meses do experimento.

Entretanto, o amostrador inteligente SBN, desenvolvido como produto desta tese, será utilizado para continuar os estudos e prover base amostral suficiente para a realização de estudos mais abrangentes sobre os processos de aporte de poluentes difusos em rios urbanos no Brasil.

CAPÍTULO 8

Conclusão

“Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende” – Guimarães Rosa, em Grande Sertão - Veredas

O desenvolvimento, a disponibilidade e o barateamento das tecnologias de microprocessamento abriram um leque de possibilidades ao monitoramento que eram impensáveis há poucos anos. Embora com aplicações distintas em diversas áreas do conhecimento, suas utilização em Recursos Hídricos ainda pode ser considerada incipiente.

A aplicação destas tecnologias ao processo de coleta de amostras visando a identificação de processos de geração e de estimativa de poluição difusa que afetam as águas dos rios brasileiros representa um avanço em termos de monitoramento e uma oportunidade para o entendimento dos processos físicos e químicos associados ao efeito e impactos de poluição difusa, durante eventos de chuvas intensas, marcados por significativo escoamento superficial.

A hipótese proposta neste trabalho – a amostragem inteligente como modo de se obter uma maior representatividade das amostras coletadas durante um evento de cheia – estabelece uma nova variável de decisão ao mecanismo de processamento do evento de escoamento superficial. A utilização do nível como “variável hidrológica dinâmica”, representa uma contribuição significativa para a reprodução dos processos hidrológicos, em contrapartida à abordagem temporal pelos equipamentos convencionais.

A estratégia de comprovação e demonstração baseou-se na utilização de dois amostradores independentes, que embora fundamentalmente diferentes, processavam a sua distribuição de forma integrada e passível de comparação. O estudo de caso baseou-se nos parâmetros para a execução da amostragem inteligente que foram levantados para a Estação Tamandaré, na Bacia do rio Barigui.

Cabe destacar que o resultado mais relevante foi uma discretização amostral fundamentada e uma ótima representação dos eventos amostrados, em especial se consideradas as variações das características dos hidrogramas em função da intensidade, duração e forma.

Para que a validação da amostragem inteligente não ficasse restrita à observação da melhor distribuição das coletas, um sensor de turbidez de alta frequência foi instalado na estação, produzindo leituras a cada 150 segundos.

Com os resultados destas leituras foi possível calcular com precisão a Turbidez média de cada evento, para que pudesse ser comparada aos valores da Turbidez média que foram obtidos a partir dos resultados das análises efetuadas nas amostras coletadas pelos amostradores inteligentes.

Neste contexto, as avaliações com a amostragem inteligente produzem, com um número muito pequeno de amostras, resultados para a Turbidez média dos eventos que muito se aproximam dos obtidos com a integração das curvas com alta frequência possíveis com a utilização desta tecnologia.

Uma das questões estudadas mais relevantes que a amostragem temporizada, ferramenta disponível no amostrador automático comercial mais conhecido, produz um resultado menos preciso com um número maior de coletas, e que este resultado é, na maioria dos casos, inferior aos valores médios de Turbidez do evento.

A campanha de amostragem realizada com amostradores inteligentes produziu uma coleção de eventos que, se deseja, iniciaram uma série histórica para a estação Tamandaré. Espera-se que em breve seja possível comparar eventos por semelhança hidrológica e/ou de qualidade de água, uma vez que a confiabilidade nos resultados de concentrações médias dos eventos para os parâmetros analisados foi substancialmente elevada pela adoção da amostragem inteligente.

Adicionalmente, foi demonstrada a técnica de utilização da programação de um *datalogger*, como ferramenta ativa no processo da tomada de decisão sobre como e quando comandar a realização de coletas por meio de um amostrador automático convencional, com ênfase na identificação de uma variável física, química ou biológica dinâmica. Nesta pesquisa, ênfase foi dada no nível de água.

Como benefício extra, decorrente do próprio esforço para comprovar a hipótese principal, o desenvolvimento do amostrador automático SBN pode vir a representar um avanço considerável para o monitoramento da qualidade da água em corpos hídricos.

Seu desenho, a facilidade de produção e seu custo são virtudes importantes, uma vez que se torna possível eliminar a importação de equipamentos caros, que limitam as pesquisas na área de qualidade de águas superficiais. Ao se obter confiabilidade, plena capacidade de amostragem, facilidade de produção e baixo custo de fabricação, consegue-se, pela primeira vez, o conjunto de fatores que torna possível o monitoramento amplo de uma bacia hidrográfica no Brasil, sob o ponto de vista da qualidade de suas águas.

Entre os próximos passos a serem trilhados na continuação deste trabalho, está a confecção industrializada da placa de comando do amostrador SBN, a ser dotada de uma

versão mais poderosa do microprocessador MSP430, para que o aparelho possa ser dotado de um número ao menos triplicado de frascos de coleta e para que a função de descarte automático de amostras indesejáveis, testada em laboratório, possa ser implementada.

REFERÊNCIAS

- ARNOLD, J.G., ALLEN, P.M. Automated Methods for Estimating Baseflow and Ground Water Recharge from Streamflow Records. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 35-2 p.411-424, 1999.
- BAKRI, D. A., RAHMAN, S., BOWLING, L. Sources and Management of Urban Stormwater Pollution in Rural Catchments, Australia. **Journal of Hydrology**, v.356 p.299-311, 2008.
- BRAGA, S. M., Análise do Potencial de Utilização de Sensores Automáticos Hidroambientais: Estudo de Caso da Bacia do Rio Barigui. **Dissertação de Mestrado**, PPGERHA, 2005.
- BRAGA, S.M., ESPÍNDOLA, M. FERNANDES, C.V.S, PORTO, M.F.A. Desenvolvimento de um amostrador automático para estimativa da poluição difusa. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2007.
- BRITES, A.P.Z. Avaliação da qualidade da água e dos resíduos sólidos no sistema de drenagem urbana – dissertação de mestrado. **Universidade Federal de Santa Maria**, 2005.
- BRITES, A.P.Z., GASTALDINI, M.C.C., SARTORI, A. Utilização de amostradores instantâneos de água para avaliação da carga poluente na drenagem pluvial urbana. **Anais do 1º Simpósio de Recursos Hídricos do Sul**, 2005.
- CHELLA, M.R., FERNANDES, C.V.S., FERMIANO, G.A., FILL, H.D. Avaliação do Transporte de Sedimentos no Rio Barigui. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10-3 p.105-111, 2005.
- COLLINS, A.L., MCGONIGLE, D.F. Monitoring and Modelling Diffuse Pollution from Agriculture for Policy Support: UK and European Experience. **Environmental Science & Policy**. v.1 p. 97 – 101, 2008.
- DAVIS, B.S., BIRCH, G.F. Catchment Wide Assessment of the Cost-Effectiveness of Stormwater Remediation Measures in Urban Areas. **Environmental Science & Policy**. v.2, p.84-91, 2009.
- DELETIC, A. The First Flush Load of Urban Surface Runoff. **Water Research**. v.32-8 p.2462-2470, 1998.
- ELLIS, J.B., MITCHELL, G. Urban Diffuse Pollution: Key Data Information Approaches for the Water Framework Directive. **Water and Environment Journal**. v.20 p.19-26, 2006.

ELLIS, J.B., REVITT, D.M. Quantifying Diffuse Pollution Sources and Loads for Environmental Quality Standards in Urban Catchments. **Water Air Soil Pollut: Focus**. v.8 p.577-585, 2008.

FERNANDES, C.V.S., MARIN, M.C.F.C., BAUMLE, A.M.B., GROXKO, P.G., MACHADO, E.S. Análise de Sustentabilidade Econômica e Ambiental de Metas de Despoluição Hídrica, Relatório Técnico, 2005.

FERRIER, R.C., D'ARCY, B.J., MACDONALD, J., AITKEN, M. Diffuse Pollution – What is the Nature of the Problem? **Water and Environment Journal**. v.19-4 p.361-366, 2005.

GASTALDINI, M.C.C., SILVA, A.R.V. Pollutant Distribution on Urban Surfaces: Case Study in Southern Brazil. **Journal of Environmental Engineering**. v.139 p.269-276, 2013.

GEONHA, K., JOONGHYUN, Y., JEOGKON, K. Diffuse Pollution Loading from Urban Stormwater Runoff in Daejeon City, Korea. **Journal of Environmental Management**, v.8 p.9-16, 2007.

HARMEL, R.D., KING, K.W., SLADE, R.M. Automated storm water sampling on small watersheds. **Applied Engineering in Agriculture**. v.19(6), pp 667-674, 2003.

HARMEL, R.D., KING, K.W., WOLFE, J., TORBERT, H.A. Minimum flow considerations for automated storm sampling on small watersheds. **Texas Journal of Science**. v.54(2), pp 177-188, 2002.

HAUPT, J.P.O., Metodologia para avaliação do potencial de produção de poluição difusa: estudo de caso da bacia do rio Jundiá. Dissertação de Mestrado, USP, 2009.

HEATHWAITE, A.L. Making Process-Based Knowledge Useable at the Operational Level: a Framework for Modelling Diffuse Pollution from Agricultural Land. **Environmental Modelling & Software**. v.18 p.753-760, 2003.

JUNG, Y.J., STENSTROM, M.K., JUNG, D.I., KIM, L.H., MIN, K.S. National Pilot Projects of Diffuse Pollution in Korea. **Desalination**. v.226 p.97-105, 2008.

KOVACS, A., HONTIB, M. Estimation of Diffuse Phosphorus Emissions at Small Catchment Scale by Gis-Based Pollution Potential Analysis. **Desalination**. v.226 p.72–80, 2008.

KRONVANG, B., GRANT, R., LAUBEL, L. Sediment and Phosphorus Export from a Lowland Catchment: Quantification of Sources. **Water, Air and Soil Pollution**, 99 p.465-476, 1997.

LEÓN, L.F., SOULIS, E.D., KOUWEN, N. FARQUHAR, G. J. Nonpoint Source Pollution: A Distributed Water Quality Modeling Approach. **Water Research**. v. 35-4, p. 997-1007, 2001

LEWIS, J., EADS, R. Implementation Guide for Turbidity Threshold Sampling: Principles, Procedures and Analysis. **United States Department of Agriculture**, General Technical Report PSW-GTR-212, 2009.

LOAGUE, K., CORWIN, D.L., Modeling Non-point Source Pollutants in the Vadose Zone Using GIS. In: Lehr, J.H. (ed.) **The Encyclopedia of Water (Volume 5)**. John Wiley & Sons, Inc, New York, NY. p. 299-305. 2005.

MANQUIZ, M.C., LEE, S., KIM, L.H. Multiple linear regression models of urban runoff pollutant load and event mean concentration considering rainfall variables. *Journal of Environmental Sciences*, v.22(6) p.946-952, 2010.

MITCHELL, G. Mapping Hazard from Urban Non-Point Pollution: a Screening Model to Support Sustainable Urban Drainage Planning. **Journal of Environmental Management**. v.74 p.1-9, 2005.

NEWHAM, L. T. H., CROKE, B. F. W., JAKEMAN, A. J. Design of water quality monitoring programs and automatic sampling techniques. **Australian National University Digital Collections**. 2004. Disponível em <http://hdl.handle.net/1885/40940> Acessado em abril/2011

NOVOTNY, V. Linking Pollution to Water Body Integrity – Literature Review. Center for Urban Environmental Studies, Northeastern University, Boston, MA, 2004. Disponível em www.coe.neu.edu/environment acessado em abril/2011

NOVOTNY, V. Diffuse Pollution Monitoring and Abatement. International Workshop on TMDL Monitoring and Abatement Program, Konkuk University, Seoul, 2008. Disponível em www.coe.neu.edu/environment/Presentations/korea_paper_2008-2.pdf acessado em abril/2011

OCKENDEN, M.C., DEASY, C., QUINTON, J.N., BAILEY, A.P., SURRIDGE, B., STOATE, C. Evaluation of Field Wetlands for Mitigation of Diffuse Pollution from Agriculture: Sediment Retention, Cost and Effectiveness. **Environmental Science & Policy**. v.24, p.110-119, 2012.

PAIVA, J. B. Monitoramento Hidrossedimentométrico em uma Pequena Bacia Hidrográfica. Instrumentação e Resultados. **Anais do XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica**, 2004.

PANAGOPOULOS, Y., MAKROPOULOS, C., MIMIKOU, M. Decision Support for Diffuse Pollution Management. **Environmental Modelling & Software**, v. 30 p. 57-70, 2012.

PARKER, J.K., MCINTYRE, D., NOBLE, R. T. Characterizing Fecal Contamination in Stormwater Runoff in Coastal North Carolina, USA. **Water Research**, 44 p. 4186-4194, 2010.

RAISIN, G.W., MITCHELL, D. S., CROOME, R. L. The Effectiveness of a Small Constructed Wetland in Ameliorating Diffuse Nutrient Loadings from an Australian Rural Catchment. **Ecological Engineering**, 9, p.19-35, 1997.

ROBERTSON, D.M. Influence of Different Temporal Sampling Strategies on Estimating Total Phosphorus and Suspended Sediment Concentrations and Transport in Small Streams. **Journal of the American Water Resources Association**, v.39(5), p.1281-1308, 2003.

ROBERTSON, D.M., ROERISH, E.D. Influence of Various Water Quality Sampling Strategies on Load Estimates for Small Streams. **Water Resources Research**, v.35-12, p.3747-3759, 1999.

RODE, M., KIWEL, U., KNOELLER, K., ZACHARIAS, S. A New Online Water Quality Monitoring System within the TERENO Hydrological Observatory BODE. **EGU General Assembly**, p.5790, disponível em <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012EGUGA..14.5790R>, acessado em 15/01/2013, 2012.

RUTLEDGE, A.T. Computer Programs for Describing the Recession of Ground-Water Discharge and for Estimating Mean Ground Water Recharge and Discharge from Streamflow Records – Update. **United States Geological Survey Water Resources Investigations Report** 98-4148, 1998.

SANSALONE, J J., CRISTINA, C.M. First Flush Concepts for Suspended and Dissolved Solids in Small Impervious Watersheds. **Journal of Environmental Engineering**, v.130(11), pp 1301-1314, 2004.

SIMPSON, D.E., STONE, V.C. A case study of urban runoff pollution: 1.Data collection, runoff quality and loads. **Water SA** v.14(4), pp 229-237. 1988.

STUMPF, C. H., PIEHLER, M.F., THOMPSON, S., NOBLE, R. T. Loading of fecal Indicator Bacteria in North Carolina Tidal Creek Headwaters: Hydrographic Patterns and Terrestrial Runoff Relationships. **Water Research** v.44, p. 4704-4715, 2010.

STUTTER, M.I., LANGAN, S.J., COOPER, R.J. Spatial Contributions of Diffuse Inputs and Within-Channel Processes to the Form of Stream Water Phosphorus over Storm Events. **Journal of Hydrology**. v.350 p.203-214, 2008.

SUAREZ, J., PUERTAS, J. Determination of COD, BOD, and Suspended Solids Loads during Combined Sewer Overflow (CSO) Events in some Combined Catchments in Spain. **Ecological Engineering**, v.24 p.201-219, 2005.

SUNG, W.Y., SE, W.C., DONG, G. O., JAE, W. L. Monitoring of Non-Point Source Pollutants Load from a Mixed Forest Land Use, **Journal of Environmental Sciences**, 22(6), p.801-805, 2010.

TELEDYNE-ISCO 6712 Portable Samplers Installation and Operation Guide. 2011 Disponível em <http://www.isco.com/pfiles/PartPDF/SL000004/UP00168U.pdf>, Acessado em maio/2011.

USEPA – CLEAN WATER ACT, 1972. Disponível em www.epa.gov/npdes/pubs/cwatxt.txt Acessado em abril/2011.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Non Source Pollution: The Nation's Largest Water Quality Problem. EPA Journal Vol 17, No 5, Nov/Dec 1991. Disponível em <http://water.epa.gov/polwaste/nps/outreach/point1.cfm> Acessado em abril/2011

WANG, L., WEI, J., HUANG, Y., WANG, G., MAQSOOD, I. Urban Nonpoint Source Pollution Buildup and Washoff Models for Simulating Storm Runoff Quality in the Los Angeles County. **Environmental Pollution**. v.159 p.1932-1940, 2011.

WITTEMBERG, H., SIVAPLAN, M., Watershed Groundwater Balance Estimation Using Streamflow Recession Analysis and Baseflow Separation. **Journal of Hydrology**. v.219 p.20-33, 1999.

YANG, Y. S., WANG, L. A Review of Modelling Tools for Implementation of the EU Water Framework Directive in Handling Diffuse Water Pollution. **Water Resources Management**. v.24 p. 1819–1843, 2010.

ZHAO, Z., FUKUSHIMA, T., ONDA, Y., MIZUGAKI, S., GOMI, T., KSUGI, K., HIRAMATSU, S., KITAHARA, H., KURAJI, K., TERAJIMA, T., MATSUSHIGE, K. TAO, F. Characterisation of Diffuse Pollutions from Forested Watersheds in Japan during Storm Events – Its Association with Rainfall and Watershed Features. **Science of Total Environment**, 390 p.215-226, 2008.

ZUCCO, E. Subsídios à gestão de recursos hídricos em bacias agrícolas e urbanas: estudo da qualidade das águas superficiais em bacias hidrográficas com monitoramento incompleto, dissertação de mestrado. dissertação de mestrado. **Universidade Regional de Blumenau**, 2011.

APÊNDICE 1

HISTÓRICO

APÊNDICE 1: HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DOS AMOSTRADORES AUTOMÁTICOS DA SERIE SB PARA POLUIÇÃO DIFUSA

HISTÓRICO – O AMOSTRADOR SB1

O desenvolvimento dos amostradores para poluição difusa com características semelhantes aos que serão utilizados nesse estudo iniciou-se em 2005 quando, a pedido da professora Mônica Ferreira do Amaral Porto, foi dada a partida para a construção de um modelo experimental.

Na época já havia interesse no estudo da poluição difusa carregada para dentro dos “piscinões” paulistanos durante os eventos de chuva intensa, para que essa alternativa reservação temporária pudesse ser melhor avaliada sob o aspecto ambiental.

A concepção inicial do equipamento foi baseada em um ANA e um AND que não dependessem de sistemas mecânicos de acionamento, o qual passaria a ser elétrico. Em tese, essa mudança resultaria em um aumento de confiabilidade do equipamento e facilitaria sua utilização.

Tanto nos ANAs como nos ANDs, a água do rio é conduzida, por gravidade e através um sifão, para dentro de cada uma das garrafas de armazenamento que compõem os equipamentos. O processo de funcionamento pode ser observado na Figura A1, que representa adequadamente a garrafa de coleta de um ANA. Uma vez que o nível do rio alcança o topo do sifão, o frasco será enchido completamente;

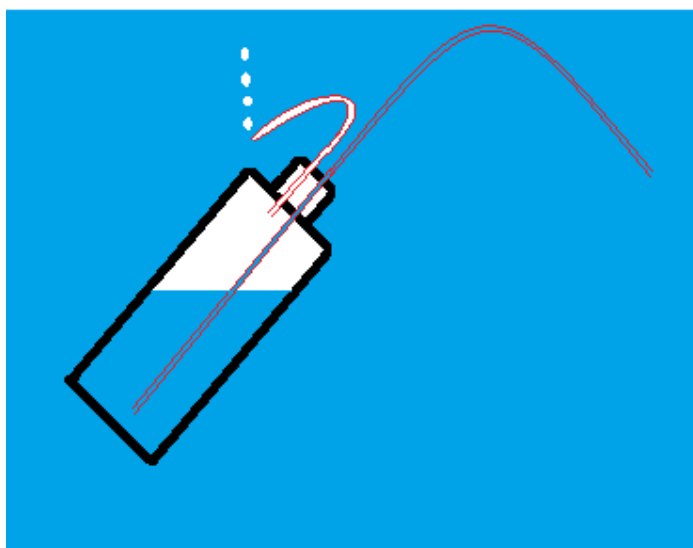


FIGURA A1 – GARRAFA DE COLETA DE UM ANA

As garrafas de coleta de um AND diferenciam-se pela existência de processo que impeça a abertura da garrafa durante a ascensão do nível, liberando o frasco para a realização da coleta quando o hidrograma estiver em recessão.

Entretanto, os mecanismos que tem a função de impedir a coleta durante a ascensão e realizá-la na altura certa durante a recessão dependem de componentes móveis que, por ficarem expostos ao ambiente, podem representar a possibilidade de falhas na amostragem.

Para que o aparelho pudesse ser acionado por um processo elétrico ao invés de mecânico, foi proposta por este pesquisador a utilização de válvulas-solenóide para o controle de abertura e fechamento das garrafas.

Entretanto, este tipo de válvula também é suscetível ao emperramento quando exposta à águas naturais, e pode representar uma resistência grande à passagem de água em baixas pressões, razão pela qual foi estudada uma mudança na configuração das garrafas de coleta.

A Figura A2 apresenta a garrafa de coleta com comando elétrico de abertura, conforme concebida para o primeiro amostrador proposto.

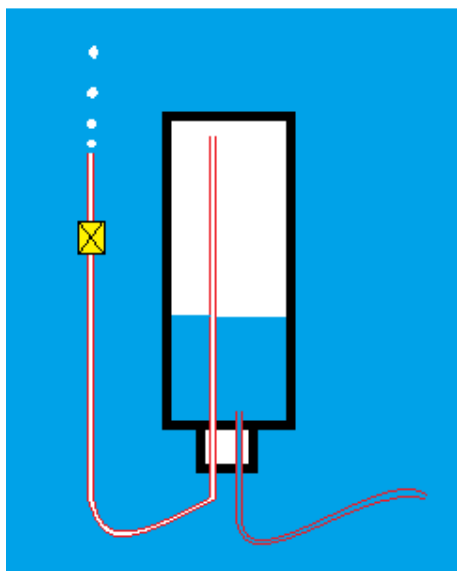


FIGURA A2 – GARRAFA DE COLETA DE UM ANA – AND COM ABERTURA CONTROLADA POR VÁLVULA SOLENOIDE.

Nessa configuração, a válvula solenoide trabalha efetivamente com ar. Quando fechada, o volume de ar existente na garrafa impede a entrada de líquido. Uma vez aberta, é liberada a saída de ar, o que permite a entrada de líquido pelo duto de entrada.

Uma vez preenchida a garrafa e fechada a válvula solenoide, fica impossibilitada a entrada de ar, o que impede a saída do líquido pelo duto de entrada, que permanece aberto todo o tempo.

A recuperação da amostra pode ser feita pelo desmonte da garrafa ou pela abertura da válvula solenoide que, ao permitir a reentrada do ar para dentro do recipiente, permitirá o esvaziamento da garrafa por gravidade (Figura A3).

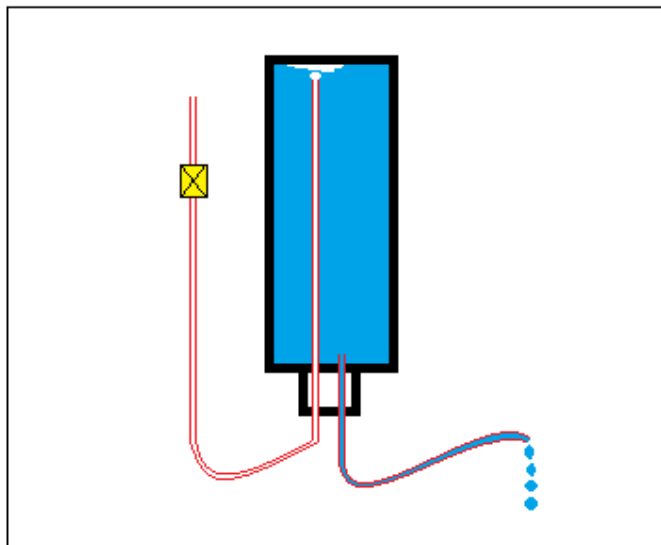


FIGURA A3 – ESQUEMA DA RECUPERAÇÃO DA AMOSTRA

Um amostrador experimental, baseado nos conceitos apresentados nos parágrafos anteriores foi construído e testado com sucesso em laboratório.

Entretanto, a adaptação de garrafas convencionais ao esquema da Figura 10 provou ser difícil do ponto de vista operacional, uma vez que dependia da confecção de tampas especiais em formato cônico – adequadas para permitir a saída de materiais decantados. Em virtude disso, optou-se pela fabricação completa de garrafas dotadas das características adequadas ao projeto.

Embora apresentasse bons resultados nos testes realizados em laboratório, o amostrador final apresentou fragilidades que inviabilizaram sua utilização em campo, uma vez que o projeto inicial foi alterado durante a execução..

O espaço previsto para as garrafas que se planejava utilizar revelou ser insuficiente para a instalação das novas garrafas, o que fez com que o amostrador, cuja concepção incluía uma tampa para proteção externa, passasse a apresentar uma configuração semelhante a uma árvore (Figura A4)

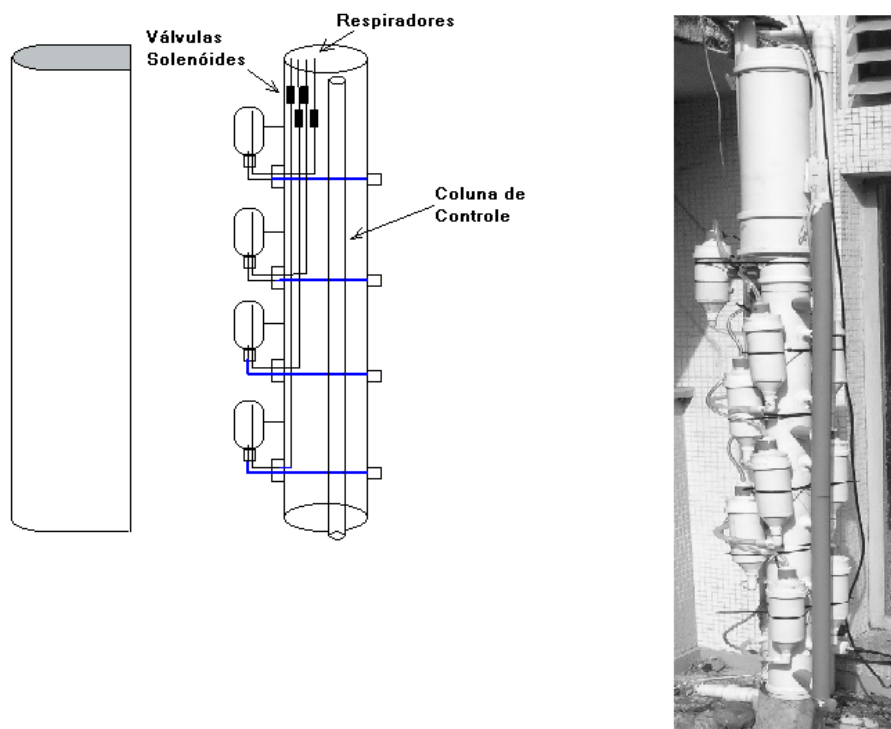


FIGURA A4 – CONCEPÇÃO INICIAL DO AMOSTRADOR E FOTO DO PROTÓTIPO

Embora não tenha sido possível instalar em campo este primeiro amostrador - batizado com a sigla SB1, na sua construção foram enfrentados desafios construtivos e adotadas soluções que influenciaram as versões mais recentes.

Na próxima seção será apresentada uma nova versão concebida e desenvolvida para o amostrador, e que será designada pela sigla SB2. Este novo aparelho será descrito em detalhes, sendo apresentadas as vantagens e desvantagens para a utilização em rios e córregos urbanos em Curitiba.

OS AMOSTRADOR SB2 e SB3

O amostrador SB2 (Figura A5) tem por finalidade maior estudar rios e córregos em bacias hidrográficas com resposta rápida, sendo que o exemplo perfeito seriam os córregos urbanos da cidade de São Paulo e os reservatórios conhecidos como “piscinões”, no mesmo município.

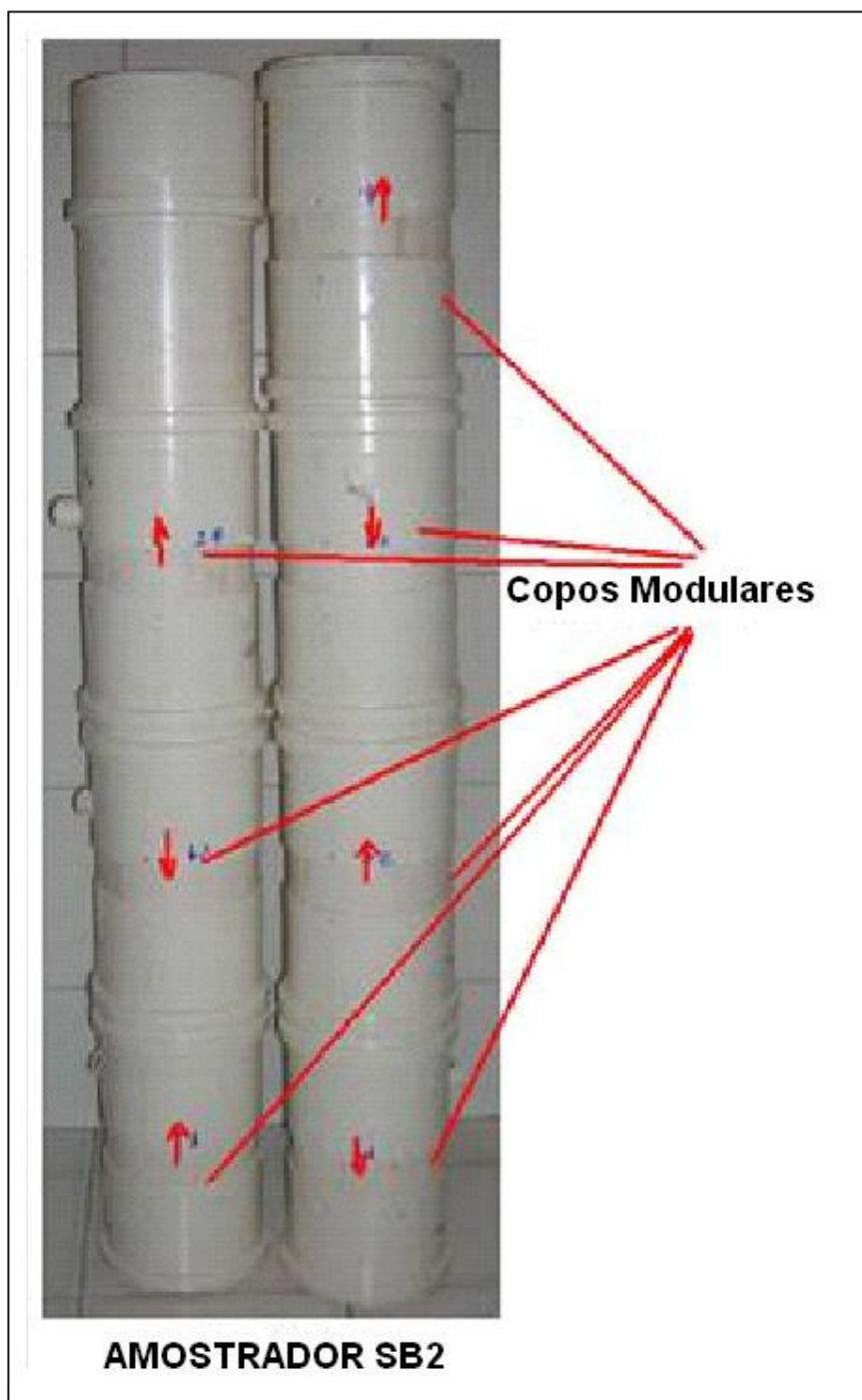


FIGURA A5: AMOSTRADOR SB2

A viabilidade da construção de um amostrador barato e eficiente decorre da solução adequada de dois problemas fundamentais.

O primeiro deles refere-se ao controle elétrico da abertura e fechamento das garrafas de coleta, o qual pode ser realizado pela utilização de válvulas-solenóide. Esses componentes são usualmente bastante caros, com custo mínimo estimado em R\$ 300,00 (*U\$ 150.00*), o que inviabilizaria a construção do equipamento se não tivesse sido encontrada, por este pesquisador, uma alternativa eficiente e com custo bastante mais baixo – R\$ 14,00 (*U\$ 7.00*)

A válvula adotada é uma variação das utilizadas em eletrodomésticos, como máquinas de lavar roupas e louça. Esses componentes apresentam desempenho satisfatório na abertura e fechamento, tendo como única desvantagem o consumo excessivo de energia elétrica durante a manobra de abertura, consumo este que não chega a comprometer a autonomia do amostrador como um todo, posto que cada garrafa é aberta apenas por um período de cerca de 4 minutos, para cada enchimento.

O segundo problema, que cabe ser mencionado, é a própria leitura do nível do rio em questão. Sensores profissionais de nível, capazes de operar em ambiente aberto, e que apresentem confiabilidade para uso em longo prazo, custam cerca de R\$ 2.000,00 (*U\$ 1,000.00*).

Uma busca no mercado revelou a existência de mini-transdutores de pressão bem mais acessíveis e muito precisos, com preços na faixa de R\$ 20,00 (*U\$ 10,00*), mas que não são concebidos para contato direto com a água. Com estes componentes foi possível fabricar sensores de nível adequadamente selados contra umidade (Figura A6), que estão sendo testados com sucesso em poços piezométricos operados por outro grupo de pesquisa (SANTOS, 2009).

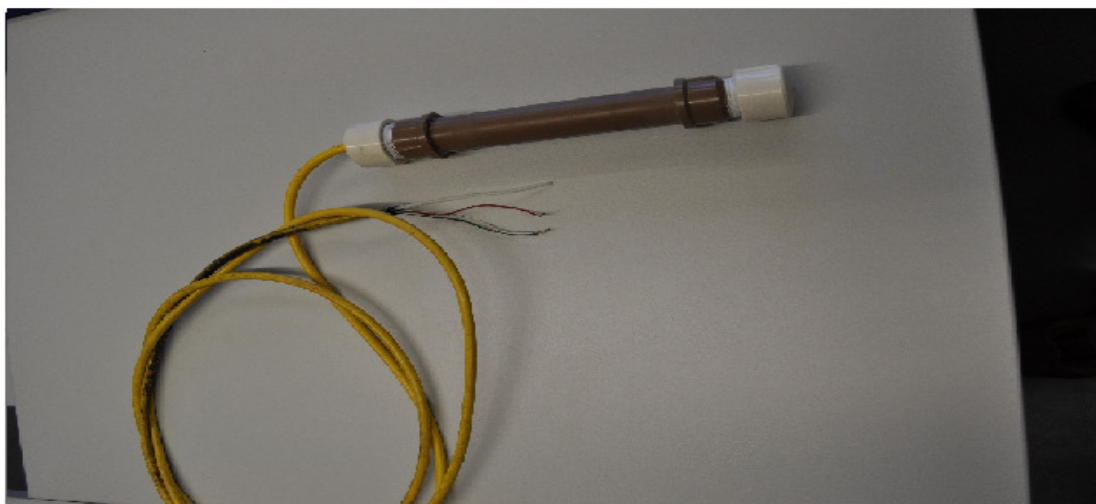


FIGURA A6: SENSOR DE NÍVEL DE BAIXO CUSTO

Cabe destacar que alguns dos sensores desenvolvidos pelo Laboratório de Monitoramento Eletrônico – LME, estão em operação há mais de 30 meses, sem apresentar falhas ou erros de medida.

Uma vez que foram solucionadas as questões da leitura de nível e da abertura e fechamento de copos de coleta, passou-se à construção dos copos de coleta propriamente ditos, que foram montados tendo por base materiais disponíveis no mercado, em especial tubos e conexões de PVC, com diâmetro de 150 mm.

O conceito utilizado na construção confere certa versatilidade ao aparelho. Os copos são construídos de maneira a possibilitar o empilhamento na vertical, utilizando luvas de 150 mm como tampas e emendas. Desta forma, é possível expandir o aparelho empilhando novos copos e tampas. Também é possível montar um número maior de torres, para permitir a coleta de um número maior de amostras.

Na Figura A7, é possível ver, do lado esquerdo, um esquema dos copos de coleta e das tampas que servem para a conexão e controle ainda separados. Os copos são construídos com fundo cônico, ligados por um sifão à tomada de água externa ao corpo do equipamento. A tampa, que também tem função de módulo de conexão entre copos subsequentes, é dotada de uma válvula solenóide que será aberta para o enchimento.

No lado direito da mesma figura pode ser visto um esquema do conjunto montado, estando copos e tampas conectados.

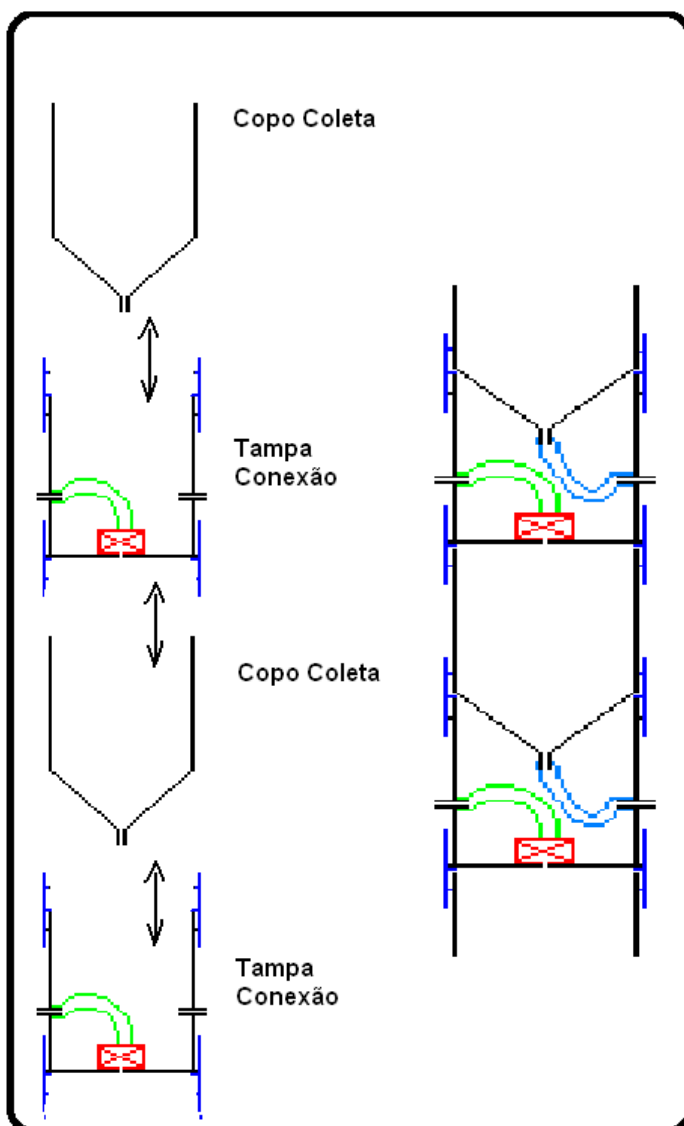


FIGURA A7 – ESQUEMA DE MONTAGEM DOS COPOS DO AMOSTRADOR SB2

Um esquema de uma torre de coleta do amostrador SB2 pode ser visto na Figura A8, exemplificando o efeito da subida de nível no amostrador. No caso apresentado, os três primeiros copos já se encontram preenchidos, tendo sido abertos para a realização da coleta durante a elevação do nível do rio. O quarto copo encontra-se aberto. A água entra, por gravidade, pela tomada de água “A” enquanto o ar é expelido pela abertura “B”, uma vez que a válvula solenoide “C” está aberta para a passagem do ar.

A vantagem de se utilizar válvulas solenoides para efetuar a abertura e o fechamento dos copos fica evidenciada se imaginarmos a mesma torre do amostrador

sendo utilizada para efetuar coletas durante a recessão do nível. Nesse caso, todos os frascos estariam vazios, aguardando que o comando eletrônico do aparelho percebesse o início da recessão. Os copos seriam preenchidos, então, de cima para baixo, acompanhando a recessão no nível do rio.

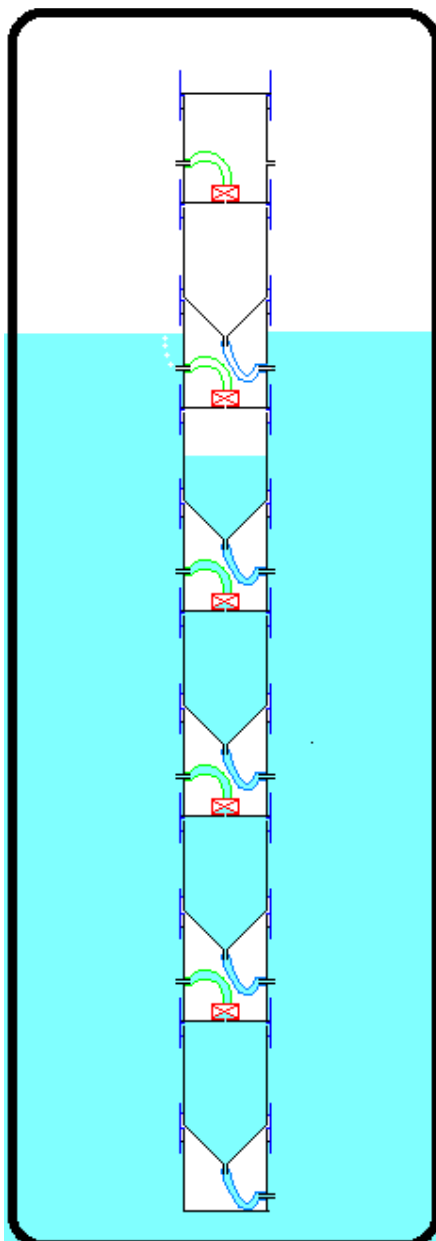


FIGURA A8: ESQUEMA DA MONTAGEM DOS COPOS DO AMOSTRADOR SB2

Uma das configurações possíveis para o amostrador SB2 é apresentada na Figura A9. Nela pode ser observado o processo operacional da amostragem ao longo de um evento de cheia em um rio qualquer.

Duas torres são instaladas, sendo uma destinada a efetuar coletas durante a subida do nível do rio e outra destinada para a recessão.

Imaginando-se que as torres estejam instaladas nas margens de um rio qualquer, e que a curva em azul represente um evento teórico de variação de nível ao longo do tempo, o amostrador funcionaria da seguinte maneira:

- Na subida de nível o aparelho liga em um determinado patamar de nível, preparando-se para a realização de coletas;
- Elevando-se o nível, quando for atingido o patamar em que está programada a coleta do primeiro copo de coleta, marcada no gráfico como posição “1a”, o aparelho abrirá o primeiro copo da torre de subida efetuando a coleta da primeira amostra;
- Continuando a elevação do nível, serão abertas as coletas “2a”, “3a” e “4a”, na medida em que o nível do rio alcançar os patamares de coleta predeterminados para cada copo;
- Durante toda a elevação de nível, os copos da torre de descida estarão fechados e vazios;
- Iniciada a recessão, o equipamento abrirá o copo de coleta “3b” quando o nível do rio estiver descendo e quando, durante a recessão, for atingido o patamar predeterminado para esta coleta;
- Os copos de coleta “2b” e “1b” serão abertos na mesma sequência, acompanhando a recessão.
- Quando, durante a recessão, o nível do rio se encontrar abaixo do patamar liga/desliga, o amostrador se desligará automaticamente;

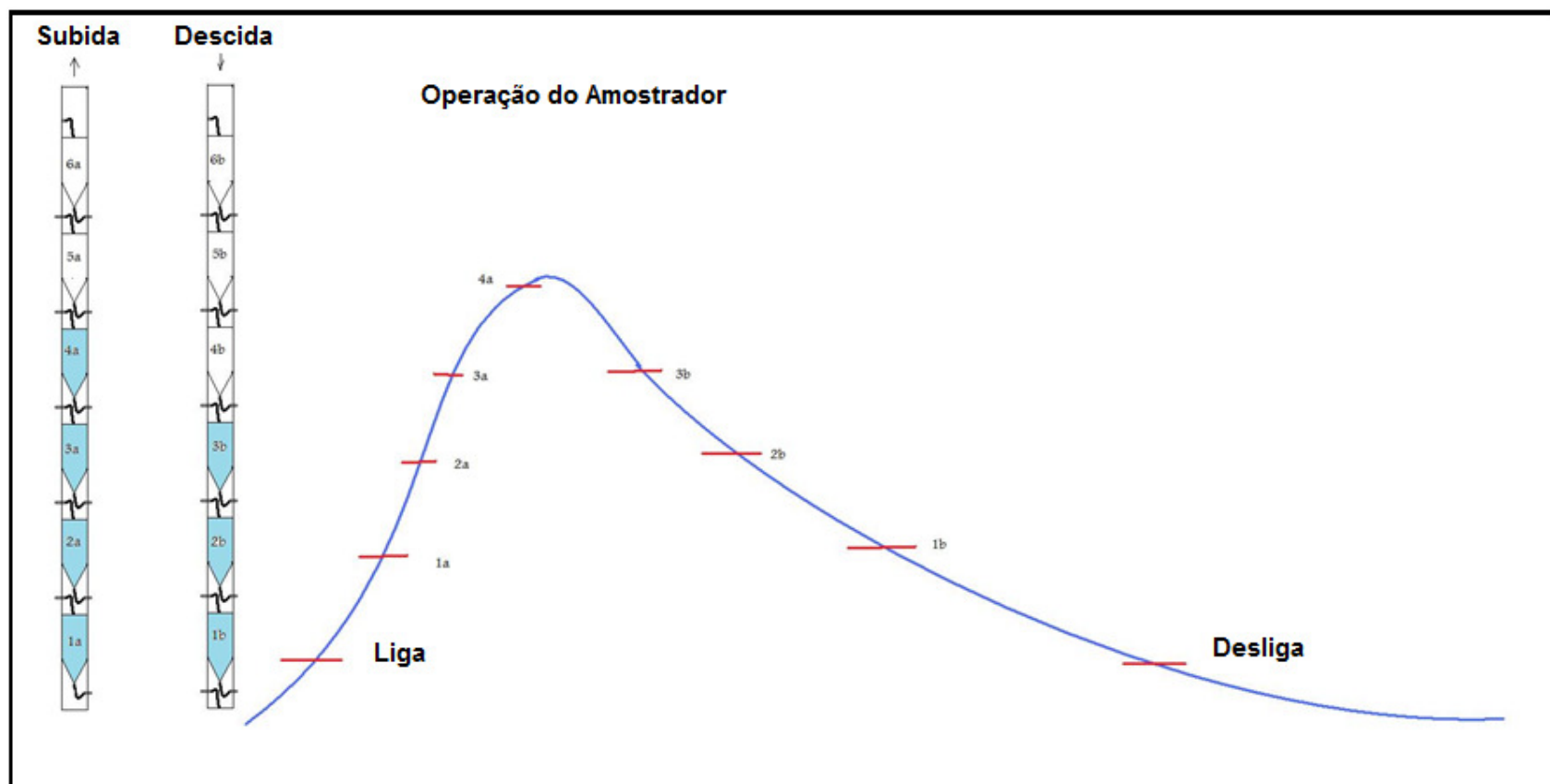


FIGURA A9: OPERAÇÃO DO AMOSTRADOR SB2

O sistema de comando que foi desenvolvido para o amostrador consiste em um módulo eletrônico de comando capaz de efetuar as seguintes funções:

- ligar o equipamento quando um nível mínimo de escoamento for atingido;
- abrir, individualmente, cada uma das garrafas de maneira sequencial, acompanhando a elevação e a recessão do hidrograma;
- manter cada uma das garrafas aberta por um período mínimo de 4 minutos, para permitir o completo enchimento, fechando-a em seguida;
- acionar um comando elétrico de aviso para travamento, se um nível mínimo, determinado pelo operador, for alcançado;
- após a recessão, se o aviso de travamento estiver presente, é realizado o travamento do equipamento;
- ou alternativamente, serão descartadas todas as amostras coletadas se o aviso de travamento não tiver sido acionado anteriormente, preparando o amostrador para coletar um próximo evento antes de desligá-lo.

O módulo de comando foi testado em laboratório e mostrou-se capaz de realizar todas as funções previstas.

Entretanto, a aplicabilidade do sistema na Bacia do Rio Barigui ou em outros rios da Região Metropolitana de Curitiba é limitada pelas características físicas dos copos de coleta. Esses copos, que precisam armazenar ao menos um litro de amostras, ao serem empilhados impõem uma variação mínima para os patamares de coleta da ordem de 25 cm, o que é demasiado grande para o Rio Barigui, pois a grande maioria das cheias deste rio na região de estudo são inferiores a um metro e raramente ultrapassam um metro e meio.

Para contornar esta dificuldade, foi proposto e construído um amostrador cujos copos são montados em paralelo, de forma a tornar possível colher amostras com uma maior resolução de nível, denominado SB3 (Figura A10).

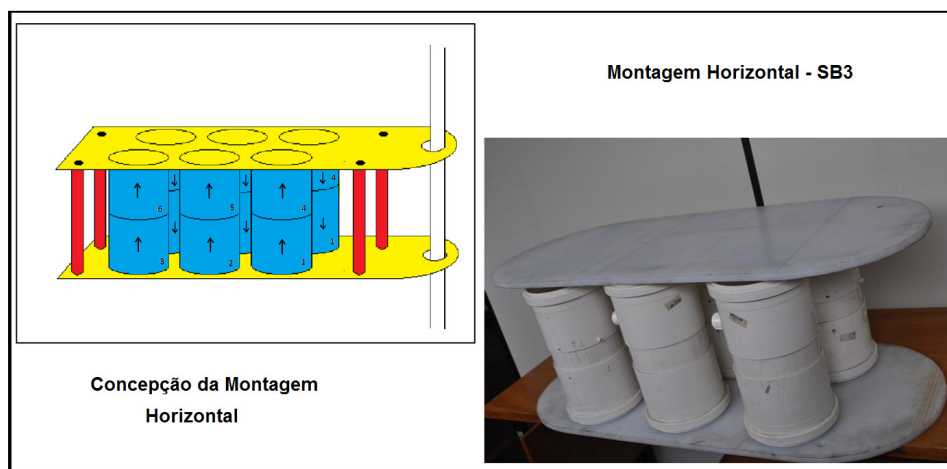


FIGURA A10: COPOS DO AMOSTRADOR SB3

Porém, aos poucos foram se tornando claras as limitações do processo de amostragem pretendido com os modelos SB1, SB2 e SB3.

Para que o aparelho pudesse se tornar viável econômica e operacionalmente foram necessários alguns saltos tecnológicos importantes, sendo que o maior deles consiste na mudança de tecnologia do módulo de comando, que precisaria deixar de ser analógico para ser microprocessado.

A adoção de um módulo de comando microprocessado reduz custos e facilita a operação, tendo ainda a vantagem de proporcionar uma grande expansão das possibilidades de utilização do equipamento ao permitir a incorporação de novas funções.

Uma vez que a decisão pela mudança de tecnologia de comando foi tomada, e que a foi aberta a possibilidade da incorporação de novas funções no amostrador, surgiu a demanda por testar, antecipadamente e em campo, as funções avançadas que são cogitadas para o amostrador.

Um estudo detalhado dos equipamentos disponíveis para uso imediato na BRB demonstrou ser possível implementar as funções cogitadas para o amostrador microprocessado desde que se pudesse: desenvolver uma programação especial no Datalogger da Estação Tamandaré, utilizar um amostrador automático convencional do tipo ISCO e montar uma interface de comunicação entre esses aparelhos, o que foi feito.

APÊNDICE 2

PROGRAMA ISCO-LOGGER

REM Programa de controle do ISCO para amostragem de eventos com base em variações de nível. Linguagem de programação específica do datalogger H-500XL.

REM Rotina inicial, direcionamento do programa em função da ocorrência de eventos.

REM Variáveis: ana1 – porta analógica do sensor de nível; b – nível da água; x – nível de referência de amostragem durante evento.

```
Measure (ana1)
Digits (2)
If ana1 > 0 then b = ana1
If a = 0 then goto 1111
If b >= x + 10 then goto 3001
If b <= x - 10 then goto 3003
End
```

1111

REM Rotina responsável por comparar o nível atual com o nível de dez minutos atrás. São coletadas informações a cada 150 segundos, de modo que as informações precisam ser salvas durante cinco ciclos de coleta para que possa ser feita a comparação adequada.

REM Variáveis: n – numero do ciclo; i, j, k, l, m – níveis em cada ciclo; r – diferença de nível entre 10 minutos; s – controle.

```
n=n+1
If n=1 then gosub 1101
If n=2 then gosub 1102
If n=3 then gosub 1103
If n=4 then gosub 1104
If n=5 then gosub 1105
```

```
If n = 1 then r=i-j
If n = 2 then r=j-k
If n = 3 then r=k-l
If n = 4 then r=l-m
If n = 0 then r=m-i
f=b-r
If s = 1 then goto 1106
End
```

1106

REM Rotina de comparação de nível para entrada em um evento, só compara se $s = 1$, ou seja, já foram coletados cinco ciclos de dados.

If $r \geq 5$ then goto 1107
End

1107

REM Entrada em um evento, marcação do nível de referência para as coletas do evento.

$x = b - 5$
goto 3001
End

1101

$i = \text{ana1}$
Return

1102

$j = \text{ana1}$
Return

1103

$k = \text{ana1}$
Return

1104

$l = \text{ana1}$
Return

1105

$m = \text{ana1}$
 $s = 1$
 $n = 0$
Return

3001

REM Rotina de coleta de subida: Comanda a amostragem do ISCO e salva em arquivo no datalogger as informações de nível e horário da amostragem.

OpenFile "B:\ISCO.txt"

Digits(0)

Writefile u +1, ";;",

Writefile day, "/", month, "/", year, " ", hours, ":", minutes, ":", seconds, ";;",

Digits(2)

Writefile b, ";;Subida"

CloseFile

a = 1

REM Nível de referência é incrementado em 10 centímetros.

x = x + 10

Goto 2001

End

3002

REM Coleta de descida do amostrador: Procede da mesma maneira da coleta de subida, entretanto caso o nível atinja a proximidade do nível de início do evento o programa encerra o evento e volta a comparar o nível a cada 10 minutos esperando um novo evento.

OpenFile "B:\ISCO.txt"

Digits(0)

Writefile u +1, ";;",

Writefile day, "/", month, "/", year, " ", hours, ":", minutes, ":", seconds, ";;",

Digits(2)

Writefile b, ";Descida"

CloseFile

x = x - 10

If b - f <= 10 then u = -1

goto 2001

End

3003

If b - f <= 10 then a = 0
If b - f <= 10 then goto 3004
goto 3002
End

3004

OpenFile "B:\ISCO.txt"
Writefile "Fim do Evento"
Writefile &0D
Closefile
End

```
2001
```

```
]
```

```
REM Comando de amostragem enviado para o ISCO através das portas digitais do  
datalogger.
```

```
setdig2
```

```
delay(1000)
```

```
cleardig2
```

```
delay(1000)
```

```
setdig2
```

```
delay(1000)
```

```
cleardig2
```

```
delay(1000)
```

```
setdig2
```

```
delay(1000)
```

```
cleardig2
```

```
u = u + 1
```

```
End
```